การดูดดึงไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูด้วยพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่
จากกากโลหกรรมเหมืองแร่ทองคำ

นางสาวเรวดี ศรีนุ้ยคง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CYANIDE, MANGANESE AND ARSENIC UPTAKE USING MONOCOT AND DICOT PLANT SPECIES FROM GOLD MINE TAILING

Miss Rewadee Srinuykong

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดดึงไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูด้วยพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่ จากกากโลหกรรมเหมืองแร่ทองคำ
โดย	นางสาวเรวดี ศรีนุ้ยคง
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนูญ หนูจักร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญรดี จันทร์ภิวัฒน์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พัฒนา อนุรักษ์พงศธร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เรวดี ศรีนุ้ยคง : การดูดดึงไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูด้วยพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่ จากกากโลหกรรมเหมืองแร่ทองคำ (CYANIDE, MANGANESE AND ARSENIC UPTAKE USING MONOCOT AND DICOT PLANT SPECIES FROM GOLD MINE TAILING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 193 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการใช้ปุ๋ยต่อการดูดดึงไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูด้วยพืชใบเลี้ยง เดี่ยว ได้แก่ หญ้าแฝก และไผ่ป่า และพืชใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ กระถินเทพา และกระถินยักษ์ บริเวณบ่อเก็บกากโลหกรรม จากการทำเหมืองแร่ทองคำ และศึกษาปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนู ในส่วนต่าง ๆ ของพืชทดลอง คือ ส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดิน สำหรับพืชใบเลี้ยงเดี่ยว และส่วนราก ลำต้น และใบ สำหรับพืชใบเลี้ยงคู่ รวมทั้งศึกษาปริมาณการสะสมไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูในกากโลหกรรม แบ่งชุดการทดลองออกเป็นการปลูกพืชในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และการปลูกพืชในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) โดยได้ทำการศึกษา 180 วัน และทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 30 วัน ผลการศึกษาปริมาณการสะสมไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูในกากโลหกรรม พบว่า มีแนวโน้มของการสะสมลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นทั้งในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง ส่วนปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนู ในส่วนต่าง ๆ ของพืชทดลอง ที่ระยะเวลาของการทดลอง 180 วัน พบว่า หญ้าแฝก และกระถินเทพา ชุดทดลองในโรงเรือนทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีความสามารถในการดูดดึงสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ได้สูงกว่าชุดทดลองในโรงเรือนทดลองที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ และชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง โดยพบว่า หญ้าแฝกสามารถดูดดึงและสะสมสารหนูและแมงกานีสไว้ในส่วนใต้ดินสูงที่สุด เท่ากับ 7.07 และ 17.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และสามารถดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ได้สูงที่สุดในส่วนเหนือดิน เท่ากับ 6.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับกระถินเทพาสามารถดูดดึงและสะสมสารหนูและแมงกานีสไว้ในส่วนใบ เท่ากับ 5.64 และ 40.51 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และสามารถดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ได้สูงที่สุดในส่วนลำต้น เท่ากับ 0.24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้น กระถินเทพาซึ่งเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ และหญ้าแฝกซึ่งเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว เป็นพืชที่มีศักยภาพสูงในการดูดดึงสารพิษ หรือช่วยในการลดปริมาณโลหะหนักดังกล่าวได้ ประกอบกับพืชดังกล่าวเป็นพืชท้องถิ่น (Native Plants) ดังนั้นผลการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาดินปนเปื้อนไซยาไนด์แมงกานีส และสารหนูในพื้นที่อื่นๆ ได้ และควรเพิ่มประสิทธิภาพการดูดดึงและสะสมโลหะหนักด้วยการใส่ปุ๋ยเคมี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2560 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

5887201320 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE
KEYWORDS: ARSENIC, CYANIDE, MANGANESE, FERTILIZER, PHYTOREMEDIATION

REWADEE SRINUYKONG: CYANIDE, MANGANESE AND ARSENIC UPTAKE USING MONOCOT AND DICOT PLANT SPECIES FROM GOLD MINE TAILING. ADVISOR: ASSOC. PROF. DR.PANTAWAT SAMPANPANISH, 193 pp.

This research was aimed to study effects of fertilizer on cyanide (CN), manganese (Mn) and arsenic (As) uptake using monocot such as *Vetiveria nemoralis (*Balansa*)* A. Camus and *Bambusa bambos* (L.) Voss and dicot such as *Acacia mangium* Willd. and *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. in tailing storage facility (TSF) from gold mine area, to examine quality of CN, Mn and As uptake and accumulation in different parts of sample plants: Above ground parts and Under ground parts for monocot and root, stem and leaf for dicot, and to investigate accumulation amount of CN, Mn and As in tailings. The experiment was divided as In-situ planting and ex-situ planting and it took 180 d for completion. Samples were collected in every 30 d. The result of studying accumulation of CN, Mn and As in tailings revealed that it was likely to decrease when the experimental time increased in both in-situ and ex-situ. Meanwhile, uptake and accumulation of CN, Mn and As in plants after 180 d was found that *Vetiveria nemoralis (*Balansa*)* A. Camus and *Acacia mangium* Willd. in ex-situ experiment with chemical fertilizer had higher CN, Mn and As uptake capacity than in ex-situ experiment with organic fertilizer and in in-situ experiment. In other words, *Vetiveria nemoralis (*Balansa*)* A.Camus could take up and accumulate most As and Mn in under ground parts equal to 7.07 and 17.03 mg/kg, respectively and it could take up and accumulate highest CN in above ground parts for 6.43 mg/kg In the meantime, *Acacia mangium* Willd. could take up and accumulate As and Mn in leaves for 5.64 and 40.51 mg/kg, respectively and could take up and accumulate highest CN in stem for 0.24 mg/kg. Therefore, *Acacia mangium* Willd. as dicot and *Vetiveria nemoralis (*Balansa*)* A. Camus as monocot had high potentials in taking up poisons or reducing quantity of such heavy metals, are native plants. Thus, findings of this study could be applied as a guideline of solving CN, Mn and As contamination problems in other areas and should be increases the efficiency of adsorption and accumulation by chemical fertilizer.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study: Environmental Science Student's Signature .....

Academic Year: 2017 Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดระยะเวลาของการศึกษา รวมทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ อิ่มยิ้ม ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร. ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญรดี จันทร์ภิวัฒน์ รองศาสตราจารย์ ดร. พัฒนา อนุรักษ์พงศธร ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบ และให้ข้อเสนอแนะเพื่อการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา ขอขอบคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ บริษัท อัครา รีซอร์สเซส จำกัด (มหาชน) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) สำหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัย เรื่อง การจัดการสารพิษในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนหน่วยปฏิบัติการวิจัย เรื่อง การจัดการเหมืองสีเขียว ขอขอบคุณสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อำนวยความสะดวกและสนับสนุนในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์อันเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณนายเอกชา ตนานนท์ชัย นางสาวฉัตรสุดา เชื้อไทย นางสาวอโณทัย โกวิทย์วิวัฒน์ นางสาวณัฐฐา คงผล นางสาวพนิตา พินภิรมย์ นางสาววัชรินทร์ ศิริสารโสภณ และพนักงานของบริษัทอัครา รีซอร์สเซส จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการออกภาคสนามและให้คำปรึกษา ตลอดจนบุคคลอื่นๆ ที่มิได้กล่าวถึงในที่นี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อนิคม คุณแม่ระวีวรรณ ศรีนุ้ยคง และบุคคลในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา ความห่วงใย และเป็นกำลังใจสำคัญให้ข้าพเจ้าตลอดมา ขอขอบคุณนางสาวพิชญา กิตติบุญญาทิวากร ที่เป็นกำลังใจที่ดีตลอดมาระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฐ
สารบัญรูป ..... ฒ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญ 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 สมมติฐาน 2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 ไซยาไนด์ (Cyanide) 5
2.1.1 แหล่งกำเนิดไซยาไนด์ 5
2.1.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของไซยาไนด์ 6
2.1.3 สถานะของสารประกอบไซยาไนด์ 9
2.1.4 เสถียรภาพของสารประกอบไซยาไนด์ 11
2.1.5 ไซยาไนด์ในสิ่งแวดล้อม 12
2.2 สารหนู (Arsenic) 13
2.2.1 แหล่งที่พบสารหนู 14
2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารหนู 14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.2.3 สารประกอบของสารหนู 14
2.2.4 การสะสมในพืชและการแสดงความเป็นพิษต่อพืช 15
2.2.5 ความเป็นพิษต่อมนุษย์ 15
2.3 แมงกานีส (Manganese) 16
2.3.1 แหล่งที่พบแมงกานีส 16
2.3.3 การสะสมในพืชและการแสดงความเป็นพิษต่อพืช 16
2.3.4 ความเป็นพิษต่อมนุษย์ 17
2.4 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของพืชใบเลี้ยงคู่และใบเลี้ยงเดี่ยว 17
2.4.1 กระถินเทพา 17
2.4.2 กระถินยักษ์ 20
2.4.3 หญ้าแฝก 23
2.4.4 ไผ่ป่า 26
2.5 ปุ๋ยอินทรีย์ 28
2.5.1 ลักษณะของปุ๋ยอินทรีย์ 28
2.5.2 ประเภทของปุ๋ยอินทรีย์ 28
2.6 ปุ๋ยเคมี 29
2.6.1 ลักษณะของปุ๋ยเคมี 29
2.6.2 ชนิดปุ๋ยเคมี 30
2.6.3 สูตรปุ๋ยหรือเกรดปุ๋ย (fertilizer grade) 30
2.6.4 หลักการใช้ปุ๋ยเคมี 30
2.6.5 ข้อดีและข้อเสียปุ๋ยเคมี 31
2.7 การบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยพืช (Phytoremediation) 31
2.7.1 ประเภทของการบำบัดโดยใช้พืช 32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.7.2 พืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักในระดับสูง (Hyperaccumulator).. 39
2.7.3 กลไกการทำงานของ Phytoremediation 40
2.7.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดึงโลหะหนักในดินและพืช..... 41
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 43
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 54
3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 54
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกพืช 54
3.1.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง 54
3.1.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ 54
3.3 วิธีดำเนินการศึกษา..... 56
3.3.1 การเตรียมพืชทดลอง 56
3.3.2 การเตรียมชุดทดลอง..... 56
3.3.3 ระยะเวลาของการทดลอง 57
3.3.4 การบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต (มวลชีวภาพและความสูง) และ ความผิดปกติของพืชทดลอง.... 57
3.3.5 การเก็บตัวอย่างพืชและกากโลหกรรม 59
3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง..... 60
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ..... 61
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง 62
4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของกากโลหกรรมในแปลงทดลอง 62
4.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำที่ใช้รดพืชทดลอง..... 63
4.3 สมบัติกากโลหกรรมตลอดระยะเวลาของการทดลอง 64
4.3.1 ความเป็นกรด-ด่าง 64
4.3.2 ค่าการนำไฟฟ้า..... 65

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.3.3 ค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน 66
4.4 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยวิธีการสกัดลำดับส่วน 67
4.5 อัตราการเจริญเติบโตของพืชทดลอง 69
4.5.1 มวลชีวภาพ (Biomass) 69
4.5.2 ความสูง (Hight) 76
4.5.3 การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (RGR) 81
4.6 การแสดงความเป็นพิษของพืช (Phytotoxicity) 89
4.6.1 การแสดงความเป็นพิษของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว 90
4.6.2 การแสดงความเป็นพิษของพืชใบเลี้ยงคู่ 95
4.7 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในส่วนต่างๆ ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว 100
4.7.1 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อปริมาณการสะสมสารหนูของหญ้าแฝกและไผ่ป่า 100
4.7.2 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสของหญ้าแฝกและไผ่ป่า 106
4.7.3 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่า 112
4.8 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในส่วนต่างๆ ของพืชใบเลี้ยงคู่ 118
4.8.1 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อปริมาณการสะสมสารหนูทั้งหมดของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ 118
4.8.2 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ 126
4.8.3 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ 133

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.9 ผลของการสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 143

4.10 ผลของการสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรม ชุดการทดลองพืช ใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 144

4.10.1 การสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรมของพืชใบ เลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)..... 144

4.10.2 การสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรมของพืช ใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 146

4.10.3 เปรียบเทียบปริมาณการสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ใน กากโลหกรรมของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 148

4.11 สมดุลมวล (Mass Balance) ของการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และ ไซยาไนด์ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 151

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 153

5.1 สรุปผลการวิจัย 153

5.1.1 ผลของการใช้ปุ๋ยต่อการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) 153

5.1.2 ผลของการใช้ปุ๋ยต่อการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 154

5.1.3 ผลของการใช้ปุ๋ยต่อการดูดดึงไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูด้วยพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่ บริเวณบ่อเก็บกากโลหกรรม จากการทำเหมืองแร่ทองคำ..... 156

5.2 ข้อเสนอแนะ 157

รายการอ้างอิง 158

ภาคผนวก ก 171

ภาคผนวก ข 172

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

ภาคผนวก ค 175

ภาคผนวก ง 177

ภาคผนวก จ 178

ภาคผนวก ฉ 180

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 193

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ค่าความเสถียร (Stability Constant: log K) ของสารประกอบไซยาไนด์ 11

ตารางที่ 3.1 การประเมินด้วยสายตาต่อความเป็นพิษของพืชหลังจากได้รับโลหะหนัก 58

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของกากโลหกรรมแปลงทดลอง (In-situ) และโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 63

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำที่ใช้รดพืชทดลอง 64

ตารางที่ 4.3 มวลชีวภาพของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) 71

ตารางที่ 4.4 มวลชีวภาพของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 72

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบมวลชีวภาพของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 75

ตารางที่ 4.6 มวลชีวภาพของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) 75

ตารางที่ 4.7 มวลชีวภาพของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 77

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบมวลชีวภาพของพืชใบเลี้ยงคู่ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 78

ตารางที่ 4.9 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) 83

ตารางที่ 4.10 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 84

ตารางที่ 4.11 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 84

ตารางที่ 4.12 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) .. 86

ตารางที่ 4.13 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 87

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 89

ตารางที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของพืชทดลองจากสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ 92

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของพืชทดลองจากสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 97

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขอบเขตการศึกษา 4

รูปที่ 2.1 ความเข้มข้นของไซยาไนด์อิสระ และไฮโดนเจนไซยาไนด์ที่ระดับ
ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่าง ๆ....6

รูปที่ 2.2 ประเภทของสารประกอบไซยาไนด์ในสภาวะต่างๆ.... 10

รูปที่ 2.3 ต้นกระถินเทพา.... 18

รูปที่ 2.4 ลักษณะส่วนต่าง ๆ ของกระถินเทพา.... 19

รูปที่ 2.5 ต้นกระถินยักษ์.... 21

รูปที่ 2.6 ลักษณะส่วนต่าง ๆ ของกระถินยักษ์.... 22

รูปที่ 2.7 ก) แฝกลุ่ม ข) แฝกดอน และ ค) แฝกหอม 23

รูปที่ 2.8 ไผ่ป่า.... 26

รูปที่ 2.9 กระบวนการ Phytoremediation 33

รูปที่ 2.10 กระบวนการ Phytoextraction.... 34

รูปที่ 2.11 ประเภทของการสกัดสารโลหะหนัก.... 35

รูปที่ 2.12 กระบวนการ Phytostabilization.... 36

รูปที่ 2.13 กระบวนการ Phytovolatilization.... 36

รูปที่ 2.14 กระบวนการ Rhizodegradation.... 38

รูปที่ 2.15 กระบวนการ Phytodegradation 39

รูปที่ 2.16 กระบวนการ Rhizofiltration 40

รูปที่ 4.1 ร้อยละของปริมาณสารหนูและแมงกานีสด้วยการสกัดลำดับส่วนในกากโลหกรรม
ของ พื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในเรือนโรงทดลอง (Ex-situ).....68

รูปที่ 4.2 น้ำหนักแห้งของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) 71

รูปที่ 4.3 น้ำหนักแห้งของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ).... 72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบน้ำหนักแห้งของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) 73
รูปที่ 4.5 น้ำหนักแห้งของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) 74
รูปที่ 4.6 น้ำหนักแห้งของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 76
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบน้ำหนักแห้งของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ... 77
รูปที่ 4.8 ความสูงของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ก) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ข) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) และ ค) เปรียบเทียบความสูงของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 79
รูปที่ 4.9 ความสูงของพืชใบเลี้ยงคู่ ก) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ข) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) และ ค) เปรียบเทียบความสูงของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 80
รูปที่ 4.10 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)..... 82
รูปที่ 4.11 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 83
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง ... 84
รูปที่ 4.13 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)..... 86
รูปที่ 4.14 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 87
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) 88
รูปที่ 4.16 อาการแสดงความเป็นพิษของหญ้าแฝกชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ).... 92
รูปที่ 4.17 อาการแสดงความเป็นพิษของไผ่ป่าชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) 93
รูปที่ 4.18 อาการแสดงความเป็นพิษของหญ้าแฝกชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 93
รูปที่ 4.19 อาการแสดงความเป็นพิษของไผ่ป่าชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 94
รูปที่ 4.20 เปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวจากสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์..... 94
รูปที่ 4.21 เปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของพืชใบเลี้ยงคู่จากสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ 97
รูปที่ 4.22 อาการแสดงความเป็นพิษของกระถินเทพาชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) 98

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.23 อาการแสดงความเป็นพิษของกระถินยักษ์ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) 98
รูปที่ 4.24 อาการแสดงความเป็นพิษของกระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) . 99
รูปที่ 4.25 อาการแสดงความเป็นพิษของกระถินยักษ์ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)... 99
รูปที่ 4.26 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมสารหนูในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) 101
รูปที่ 4.27 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมสารหนูในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)..... 103
รูปที่ 4.28 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมสารหนูในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ) 104
รูปที่ 4.29 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมสารหนูในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ) 104
รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมสารหนูในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 105
รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมสารหนูในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 105
รูปที่ 4.32 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ).....108
รูปที่ 4.33 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ).....108
รูปที่ 4.34 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลอง 109
รูปที่ 4.35 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลอง 109
รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 111

รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสในส่วนใต้ดิน ของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และ ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 111
รูปที่ 4.38 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่า ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)..... 113
รูปที่ 4.39 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่า ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)..... 113
รูปที่ 4.40 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่า ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)..... 114
รูปที่ 4.41 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าใน ชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)..... 114
รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในส่วนเหนือดิน ของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และ ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 117
รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝก และไผ่ป่าในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือน ทดลอง (Ex-situ)..... 117
รูปที่ 4.44 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมสารหนูในส่วนรากของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)..... 119
รูปที่ 4.45 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมสารหนูในส่วนลำต้นของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)..... 120
รูปที่ 4.46 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมสารหนูในส่วนใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)..... 120
รูปที่ 4.47 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมสารหนูในส่วนรากของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)..... 121
รูปที่ 4.48 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมสารหนูในส่วนลำต้นของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)..... 122
รูปที่ 4.49 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมสารหนูในส่วนใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)..... 123

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.50 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมสารหนูในส่วนรากของ
กระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)
และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 124
รูปที่ 4.51 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมสารหนูในส่วนลำต้นของ
กระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)
และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 124
รูปที่ 4.52 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมสารหนูในส่วนใบของ
กระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)
และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 125
รูปที่ 4.53 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนรากของกระถินเทพาและ
กระถินยักษ์ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)..... 129
รูปที่ 4.54 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนลำต้นของกระถินเทพาและ
กระถินยักษ์ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)..... 129
รูปที่ 4.55 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนใบของกระถินเทพาและ
กระถินยักษ์ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)..... 130
รูปที่ 4.56 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนรากของกระถินเทพาและ
กระถินยักษ์ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ) 130
รูปที่ 4.57 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนลำต้นของกระถินเทพาและ
กระถินยักษ์ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ) 131
รูปที่ 4.58 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนใบของกระถินเทพาและ
กระถินยักษ์ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ) 131
รูปที่ 4.59 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสในส่วนราก
กระถินเทพาและกระถิน-ยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)
และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 133
รูปที่ 4.60 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสในส่วนลำต้น
กระถินเทพาและกระถิน-ยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)
และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 134
รูปที่ 4.61 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสในส่วนใบ
กระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)
และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 134

รูปที่ 4.62 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนรากของกระถินเทพาและ
กระถินยักษ์ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ).....135
รูปที่ 4.63 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนลำต้นของกระถินเทพาและ
กระถินยักษ์ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)..... 135
รูปที่ 4.64 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์... 138
รูปที่ 4.65 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนรากของกระถินเทพาและ
กระถินยักษ์ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)..... 139
รูปที่ 4.66 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนลำต้นของกระถินเทพาและ
กระถินยักษ์ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)..... 140
รูปที่ 4.67 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนใบของหญ้าแฝกและไผ่ป่าใน
ชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)..... 141
รูปที่ 4.68 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในส่วนรากของ
กระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)
และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 141
รูปที่ 4.69 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในส่วนลำต้น
ของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)
และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 142
รูปที่ 4.70 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในส่วนใบของ
กระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)
และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)..... 142
รูปที่ 4.71 ปริมาณการสะสมสารหนูในกากโลหกรรมชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง
(In-situ) 145
รูปที่ 4.72 ปริมาณการสะสมแมงกานีสในกากโลหกรรมชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง
(In-situ) ก) พืชใบเลี้ยงเดี่ยว และ ข) พืชใบเลี้ยงคู่..... 145
รูปที่ 4.73 ปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในกากโลหกรรมชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง
(In-situ) 146
รูปที่ 4.74 ปริมาณการสะสมสารหนูในกากโลหกรรมชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง
(Ex-situ)..... 147
รูปที่ 4.75 ปริมาณการสะสมแมงกานีสในกากโลหกรรมชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง
(Ex-situ)..... 148

รูปที่ 4.76 ปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในกากโลหกรรมชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (Ex-situ)..... 148
รูปที่ 4.77 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมสารหนูในกากโลหกรรม ก) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และ ข) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 150
รูปที่ 4.78 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสในกากโลหกรรม ก) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และ ข) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 150
รูปที่ 4.79 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในกากโลหกรรม ก) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และ ข) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 151

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นได้ในทุกแหล่งกำเนิดของแต่ละประเทศ หากแต่ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่อยู่ในภาวะวิกฤติแล้วย่อมส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งมีชีวิต อาทิ การปนเปื้อนของเสียอันตราย หรือโลหะหนักในดิน อากาศและแหล่งน้ำ เป็นต้น ซึ่งปัญหาดังกล่าวมักเกิดจากการทำกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เช่น กิจกรรมการทำเหมือง และกิจกรรมทางการเกษตรที่มีการเปิดหน้าดินเพื่อการเพาะปลูก ทำให้โลหะหนักมีการแพร่กระจายลงสู่แหล่งน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และถูกสะสมในดิน ประกอบกับสภาพทางธรรมชาติและลักษณะทางของธรณีวิทยาก็เป็นสาเหตุที่สำคัญของการปนเปื้อนโลหะหนัก ซึ่งเกิดจากกระบวนการผุพังสลายตัวตามธรรมชาติของพื้นที่ โดยเฉพาะการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนักในแหล่งน้ำ ดิน และพืชในพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ของจังหวัดพิจิตร เพชรบูรณ์ พิษณุโลก และเลย หรือเป็นพื้นที่ที่มีแร่โลหะเกิดขึ้นหลายชนิด เช่น แร่ทอง แร่เหล็ก และแร่เงิน เป็นต้น จากการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำ ดิน และพืช กว่า 600 ตัวอย่าง โดยรอบพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ทองคำที่มีการทำเหมือง พบว่า มีการปนเปื้อนไซยาไนด์ แมงกานีส สารหนู และตะกั่ว เกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด (กรมควบคุมมลพิษ, 2559ข) อีกทั้งมีการสะสมในร่างกายของชาวบ้านในบริเวณโดยรอบของพื้นที่การทำเหมืองแร่

จากประเด็นปัญหาดังกล่าว แนวทางหนึ่งที่นำมาพิจารณาเพื่อการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนซึ่งเป็นเทคโนโลยีในการบำบัดโลหะหนักในดินที่มีหลายวิธี ทั้งเทคโนโลยีทางชีวภาพ เช่น การฟื้นฟูสภาพโดยชีววิธี (Bioremediation) เป็นการจัดการพื้นที่ปนเปื้อนด้วยการใช้จุลชีพหรือจุลินทรีย์ เทคโนโลยีทางเคมีและฟิสิกส์ เช่น การล้างดิน (Soil Washing) ซึ่งในปัจจุบันมีอีกวิธีการหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ คือ การใช้พืช (Phytoremediation) เป็นการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโดยการดูดดึงโลหะหนักไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืช และเป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำ (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558) สามารถสร้างทัศนียภาพของพื้นที่ได้ดี

การศึกษาครั้งนี้จึงได้นำเทคโนโลยีการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนด้วยพืช (Phytoremediation) มาใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนู จากดินปนเปื้อนโดยใช้ กระถินเทพา (*Acacia manglium* Willd.) กระถินยักษ์ (*Leuceana leucocephala* (Lam.) de Wit.) หญ้าแฝกดอน (*Vetiveria nemoralis* (Balansa) A. Camus) และไผ่ป่า (*Bambusa bambos* (L.) Voss) ซึ่งพืชดังกล่าวเป็นพืชท้องถิ่นที่ขึ้นอยู่ในบริเวณโดยรอบของพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ทองคำที่มีการทำเหมือง

ทองคำ มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี การเจริญเติบโตเร็ว และสามารถปลูกได้ทั่วไปในทุกพื้นที่ ผลการศึกษาในครั้งนี้จึงคาดว่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่จริงที่มีการปนเปื้อนไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูได้

1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อศึกษาอัตราการเติบโต การแสดงความเป็นพิษของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ได้แก่ หญ้าแฝก และไผ่ป่า และพืชใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ กระถินเทพา กระถินยักษ์ ในพื้นที่บ่อเก็บกากโลหกรรม

2) เพื่อศึกษาผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึงไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูของพืชศึกษาในพื้นที่บ่อเก็บกากโลหกรรม

3) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดดึงไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนู ที่สะสมในส่วนต่าง ๆ ของพืช ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ สำหรับพืชใบเลี้ยงคู่ และส่วนใต้ดินและส่วนเหนือดินของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว

1.3 สมมติฐาน

ประสิทธิภาพการดูดดึงไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูของกระถินเทพา กระถินยักษ์ หญ้าแฝก และไผ่ป่า มีความแตกต่างกันระหว่างการใส่ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ และตามระยะเวลาการเติบโตของพืชศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาความสามารถของพืช ได้แก่ กระถินเทพา กระถินยักษ์ หญ้าแฝก และไผ่ป่า ในการดูดดึงไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนู จากบ่อเก็บกากโลหกรรมที่เกิดจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ทองคำ โดยนำไปสะสมไว้ในส่วนต่างๆ ของพืชทดลอง สำหรับขอบเขตของการศึกษาในครั้งนี้ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 1.1 โดยมีรายละเอียดของขอบเขตการศึกษา ดังต่อไปนี้

1) ทำการทดลองในพื้นที่บ่อเก็บกากโลหกรรมและในโรงเรือนทดลอง

2) กากโลหกรรมที่ใช้ในการศึกษา มาจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ทองคำ โดยทำการปลูกพืชทดลองในบ่อเก็บกากโลหกรรมที่ปิดแล้วแต่รอการปิดอย่างถาวร

3) พืชที่ใช้ในการศึกษา แบ่งเป็นพืช 2 กลุ่ม ได้แก่ พืชใบเลี้ยงคู่ (Dicot Species) ได้แก่ กระถินเทพา และกระถินยักษ์ และพืชใบเลี้ยงเดี่ยว (Monocot Species) ได้แก่ หญ้าแฝก และไผ่ป่า

4) การคัดเลือกพืชที่ใช้ในการทดลอง ควรคัดเลือกให้มีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกัน และพืชที่นำมาใช้ต้องมีความสมบูรณ์แข็งแรง

5) การดูแลรักษา ทำการรดน้ำทุกวันในช่วงเช้า และใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 และปุ๋ยคอก ในวันแรกของการทดลอง และใส่อีกครั้งในวันที่ 30 ของการทดลอง

6) ระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด คือ 180 วัน โดยทำการเก็บตัวอย่างพืช และกากโลหกรรม ทุกๆ 30 วัน ตลอดระยะเวลาของการทดลอง คือ ในวันที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน เป็นเวลา 6 เดือน

7) ทำการบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต ความผิดปกติ และความเป็นพิษของพืชทดลองตลอดระยะเวลาของการทดลอง

8) ตัวอย่างพืชทดลอง ทำการเก็บตัวอย่างตามระยะเวลาของการทดลอง โดยการแยกส่วนออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ สำหรับพืชใบเลี้ยงคู่ และ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดิน สำหรับพืชใบเลี้ยงเดี่ยว สำหรับตัวอย่างกากโลหกรรมได้ทำการเก็บตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างพืช

9) การเก็บตัวอย่างพืช โดยทำการเก็บตัวอย่างพืชทุก ๆ 30 วัน ได้แก่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน นำมาล้างน้ำให้สะอาด 3-4 ครั้ง ล้างน้ำกลั่น 1 ครั้ง จากนั้นแยกพืชออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่ 1 สำหรับวิเคราะห์ไซยาไนด์ และส่วนที่ 2 สำหรับวิเคราะห์แมงกานีส และสารหนูทั้งหมด

10) ตัวอย่างพืชทดลองและกากโลหกรรม ได้นำตัวอย่างทั้งหมดไปวิเคราะห์หาปริมาณการสะสมไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูทั้งหมดในห้องปฏิบัติการ

11) แผนการทดลอง ได้ปฏิบัติการทดลอง จำนวน 3 ซ้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ทราบประสิทธิภาพการดูดดึงไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนู ของกลุ่มพืชใบเลี้ยงคู่ และกลุ่มพืชใบเลี้ยงเดี่ยว

2) ทราบผลของปุ๋ยที่มีศักยภาพในการช่วยดูดดึงไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนู

3) ผลของการทดลองนำมาใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาดินปนเปื้อนไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูในพื้นที่อื่น ๆ ได้

4) ข้อเสนอแนะแนวทางในการบำบัดไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูด้วยพืช

รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขอบเขตการศึกษา

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไซยาไนด์ (Cyanide)

2.1.1 แหล่งกำเนิดไซยาไนด์

ไซยาไนด์ (Cyanide) เป็นชื่อเรียกกลุ่มสารประกอบที่ประกอบด้วย คาร์บอน (Carbon: C) 1 อะตอมและไนโตรเจน (Nitrogen: N) 1 อะตอม ซึ่งมีหลายชนิด เป็นสารเคมีที่สามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติ อาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารเคมีต่างๆ ในธรรมชาติ หรือจากการขับถ่ายของเสียหรือจากการสลายตัวของสารประกอบบางชนิดในธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ พืชและสัตว์ มีพืชอย่างน้อยกว่า 1,000 ชนิดและจุลินทรีย์มากกว่า 90 สายพันธุ์ที่สามารถสังเคราะห์ไซยาไนด์ได้ ไซยาไนด์ที่ได้จากจุลินทรีย์จะเกิดจากการย่อยสลาย Glycine โดยการกระตุ้นของ Methionine หรือ Methyl group donor อื่น ๆ ดังสมการที่ 2.1

$$NH_2CH_2COOH \longrightarrow HCN + CO_2 + 4H^+ \qquad (2.1)$$

นอกจากนี้มีพืชชั้นสูงกว่า 800 ชนิดรวมถึงพืชผลทางการเกษตรที่มีไซยาไนด์เป็นองค์ประกอบ (Cyanogenic) เช่น มันสำปะหลัง ข้าวฟ่าง ไผ่ ข้าวโพด อัลมอนด์ และฝ้าย เป็นต้น พืชที่สามารถสังเคราะห์ Cyanoglycoside ได้ เมื่อเกิดการย่อยสลายก็จะทำให้เกิดไซยาไนด์ (Cyanogenesis) ส่วนสัตว์จำพวกแมลงหลายชนิด เช่น ตะขาบ กิ้งกือ แมลงปีกแข็ง ผีเสื้อราตรี และผีเสื้อ เป็นต้น สามารถสร้างไซยาไนด์และปล่อยออกมาเพื่อป้องกันอันตรายจากศัตรู นอกจากนี้ในร่างกายมนุษย์ยังมีไซยาไนด์ในส่วนต่างๆ เช่น ในน้ำลายมีไทโอไซยาเนท 0.217 กรัมต่อลิตรขึ้นไป ในปัสสาวะอาจมีไทโอไซยาเนทได้ถึง 0.006 กรัมต่อลิตร และน้ำย่อยในกระเพาะอาหารมีไทโอไซยาเนท 0.007 กรัมต่อลิตรขึ้นไป รวมถึงวิตามินบี 12 ก็มีไซยาไนด์เป็นองค์ประกอบ (Cyanocobalamin : $C_{63}H_{88}O_{14}N_{14}PCo$) อย่างไรก็ตามแหล่งกำเนิดความเป็นพิษของไซยาไนด์ที่สำคัญไม่ได้เกิดจากธรรมชาติ เนื่องจากไซยาไนด์ที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ ส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ท่อไอเสียรถยนต์ และควันบุหรี่ นอกจากนี้ยังพบว่า ผลิตภัณฑ์หลายชนิดมีไซยาไนด์เป็นส่วนประกอบ เช่น กาแฟ เกลือ สีทาบ้าน และยารักษาโรคหลายชนิด เช่น Laetrile (ยารักษาโรคมะเร็ง ซึ่งเตรียมจากเมล็ดแอปริคอท) และ Sodium Nitroprusside (ยาลดความดัน) ซึ่งจะปล่อยไซยาไนด์ออกมาโดยกระบวนการเผาผลาญสารอาหารในร่างกาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.1.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของไซยาไนด์

2.1.2.1 ประเภทของสารประกอบไซยาไนด์

ไซยาไนด์ หมายถึง สารประกอบที่ประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอมและไนโตรเจน 1 อะตอม ซึ่งมีหลายชนิด สามารถแบ่งสารประกอบดังกล่าว เป็น 5 กลุ่มหลัก ได้ดังนี้

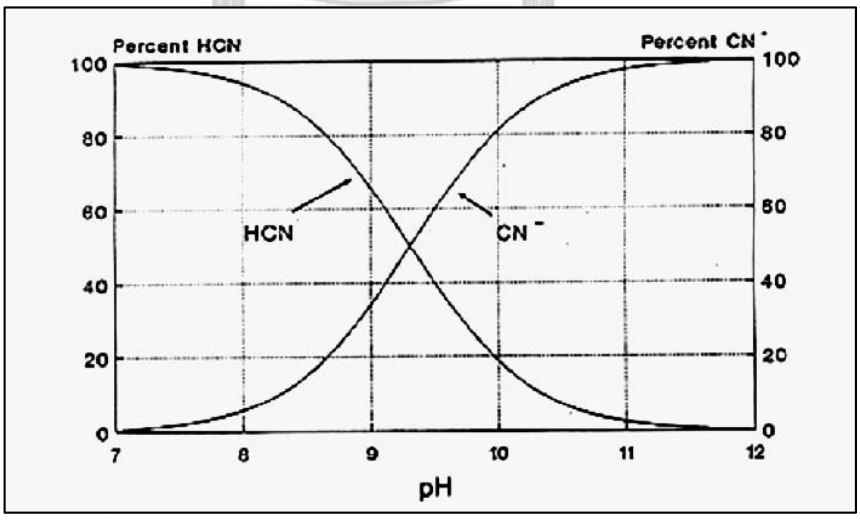
1) Free Cyanide

Free Cyanide หมายถึง ไซยาไนด์อิสระซึ่งอยู่ในรูปไซยาไนด์ ไอออน (Cyanide ion: CN^-) และไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen cyanide: HCN) ทั้งที่อยู่ในรูปสารละลายและก๊าซ ดังสมการ 2.2-2.3

$$CN^- + H^+ \longrightarrow HCN_{(aq)} \qquad (2.2)$$

$$HCN_{(aq)} \longrightarrow HCN_{(g)} \qquad (2.3)$$

อย่างไรก็ตามความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่ 9.3-9.5 สารละลายไซยาไนด์ไอออน และไฮโดรเจนไซยาไนด์จะอยู่ในภาวะสมดุล ถ้า pH 11 สารละลายจะอยู่ในรูปไซยาไนด์ไอออนมากกว่า 99% แต่ถ้า pH 7 สารละลายจะอยู่ในรูปไฮโดรเจนไซยาไนด์มากกว่า 99% แม้ว่าไฮโดรเจนไซยาไนด์จะลายน้ำได้ แต่ถ้าอุณหภูมิและความเค็มเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการละลายน้อยลง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความเข้มข้นของไซยาไนด์อิสระ และไฮโดนเจนไซยาไนด์ที่ระดับความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่าง ๆ

ที่มา : Botz, 2001

2) Simple Cyanide

Simple Cyanide หมายถึง สารประกอบโลหะไซยาไนด์อยู่ในรูปของเกลือไซยาไนด์ซึ่งแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ตามความสามารถในการละลาย ได้แก่

2.1) Soluble Simple Cyanide Complex

Soluble Simple Cyanide Complex เป็นสารประกอบไซยาไนด์ที่สามารถละลายน้ำได้ง่าย โดยมีโลหะหมู่ 1 และ 2 เป็นองค์ประกอบ เช่น โซเดียมไซยาไนด์ (Sodium Cyanide: NaCN), โพแทสเซียมไซยาไนด์ (Potassium Cyanide: KCN), แคลเซียมไซยาไนด์ (Calcium Cyanide: Ca $(CN)_2$) และรวมถึงปรอทไซยาไนด์ (Mercury Cyanide : $Hg(CN)_2$) ด้วย เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้ Free Cyanide ที่มีความเป็นพิษสูง

2.2) Insoluble Simple Cyanide Complex

Insoluble Simple Cyanide Complex เป็นสารประกอบไซยาไนด์ที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้ยาก โดยมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ เช่น สังกะสีไซยาไนด์ (Zinc Cyanide : $Zn(CN)_2$), ทองแดงไซยาไนด์ (Copper Cyanide : CuCN), นิกเกิลไซยาไนด์ (Nickel Cyanide : $Ni(CN)_2$) และเงินไซยาไนด์ (Silver Cyanide : AgCN)

3) Complex Cyanide

Complex Cyanide หมายถึง สารประกอบไซยาไนด์เชิงซ้อนกับโลหะอื่นๆ เช่น สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม เป็นต้น ซึ่งแบ่งเป็น 3 กลุ่ม ตามความสามารถในการแตกตัว (Dissociation) ดังนี้

3.1) Weak Acid Dissociable Cyanide

Weak Acid Dissociable Cyanide (WAD Cyanide) เป็นกลุ่มสารประกอบไซยาไนด์ที่สามารถแตกตัวได้ปานกลางถึงง่าย เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดอ่อน เช่น $Zn(CN)_4^{2-}$, $Cd(CN)_4^{2-}$ และ $Cd(CN)^{3-}$

3.2) Moderately Strong Acid Dissociable Cyanide

Moderately Strong Acid Dissociable Cyanide เป็นสารประกอบไซยาไนด์ที่สามารถแตกตัวได้บ้างเล็กน้อยเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดอ่อน เช่น $Cu(CN)^{2-}$, $Cu\ (CN)_3^{2}$, $Ni(CN)_4^{2-}$ และ $Ag(CN)_2^{-}$

3.3) Strong Acid Dissociable Cyanide

Strong Acid Dissociable Cyanide (SAD Cyanide) เป็นสารประกอบไซยาไนด์ที่สามารถแตกตัวได้ยากเมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นกรดที่อุณหภูมิห้อง แต่สามารถแตกตัวได้ดีขึ้นเมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นกรดแก่และอุณหภูมิสูงขึ้น เช่น $Fe(CN)_6^{4-}$, $Fe(CN)_6^{3-}$, $Co(CN)_6^{4-}$ และ $Au(CN)_2^{-}$

อย่างไรก็ตามแม้ว่า Hexacyanoferrate (II) ion $[Fe(CN)_6]^{4-}$ และ Hexacyanoferrate (III) ion $[Fe(CN)_6]^{3-}$ จะอยู่ในสภาพที่ค่อนข้างเสถียร แต่สามารถแตกตัวให้ Free Cyanide ได้เมื่อได้รับแสงอัลตร้าไวโอเลตโดยตรง ดังสมการที่ 2.4-2.5

$$Fe(CN)_6^{3-} + H_2O \longrightarrow [Fe(CN)_5H_2O]^{2-} + CN^- \quad (2.4)$$

$$[Fe(CN)_5 H_2O]^{2-} + H_2O \longrightarrow Fe(OH)_{3(S)} + 5CN^- + 3H^+ \quad (2.5)$$

สารประกอบในกลุ่มนี้เมื่อรวมตัวกับโลหะอีกตัวหนึ่ง (Double Metallocyanide Complex) จะเกิดอะตอมของสารประกอบเชิงซ้อน ดังสมการที่ 2.6

$$Fe(CN)_6^{4-} + 2M^{2+} \longrightarrow M_2Fe(CN)_{6(S)} \quad (2.6)$$

ทั้งนี้หากโลหะดังกล่าวเป็นโลหะอัลคาไลน์ เช่น $K_3Fe(CN)_6$ ตะกอนที่เกิดขึ้นจะละลายน้ำได้ อาจจะเกิดการแตกตัวให้ไซยาไนด์อิสระได้ แต่ถ้าเป็นโลหะหนัก เช่น $Cu_3Fe(CN)_6$ ตะกอนที่เกิดจะไม่ละลายน้ำ

4) Total Cyanide

Total Cyanide หมายถึง สารประกอบทุกตัวที่มีไซยาไนด์อิออนเป็นองค์ประกอบทั้งที่แตกตัวง่ายและแตกตัวยาก ซึ่งไม่รวมไซยาเนท (Cyanate: CNO^-) และไทโอไซยาเนท (Thiocyanate: SCN^-)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5) Total Cyanide

สารประกอบที่เกี่ยวข้องกับไซยาไนด์มีหลายชนิดอาจเกิดจากกระบวนการบำบัดไซยาไนด์หรืออาจเกิดจากการทำปฏิกิริยากับสารอื่นในธรรมชาติ ทำให้เกิดสารประกอบต่างๆ เช่น

5.1) Cyanate (CNO^-)

Cyanate เป็นสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไซยาไนด์กับสารออกซิแดนซ์ (Oxidizing Reagent) เช่น คลอรีน (Chlorine: Cl_2), ไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite: ClO^-), โอโซน (Ozone: O_3) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide: H_2O_2) ซึ่งจะถูกไฮโดรไลซ์ (Hydrolyze) กลายเป็นแอมโมเนีย (Ammonia: NH_3) และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide: CO_2)

5.2) Thiocyanate (SCN^-)

Thiocyanate เป็นสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไซยาไนด์ (Cyanide) กับไทโอซัลเฟต (Thiosulphate) หรือซัลไฟด์อิออน (Sulfide ion) และสามารถแตกตัวได้ในกรดอ่อน แต่เป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์ถึง 7 เท่า ไทโอไซยาเนทจะถูกออกซิไดซ์ (Oxidize) กลายเป็นคาร์บอเนต (Carbonate: CO_3^{2-}) ซัลเฟต (Sulfate: SO_4^{2-}) และแอมโมเนีย (Ammonia: NH_3)

5.3) Cyanogen Chloride (ClCN)

Cyanogen Chloride เป็นสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายไซยาไนด์กับไฮโปคลอไรต์ (Intermediate Compound) จากนั้นก็จะกลายเป็นไซยาเนท

5.4) Chloramine (NH_2Cl)

Chloramine เป็นสารประกอบที่เกิดจากการบำบัดไซยาไนด์ด้วยวิธี Alkaline Chlorination เป็นพิษน้อยกว่าไซยาไนด์แต่มักพบในปริมาณค่อนข้างสูง

5.5) Cyanogen (NC^-CN)

Cyanogen จะเกิดในสภาพที่เป็นกรดเมื่อทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ (Oxidizing Reagent)

5.6) Nitrate และ Ammonia

ไนเตรท (Nitrate: NO_3^-) และแอมโมเนีย (Ammonia: NH_3) เป็นสารที่เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบต่างๆ ข้างต้น ถ้ามีความเข้มข้นสูงก็จะเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ

2.1.3 สถานะของสารประกอบไซยาไนด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

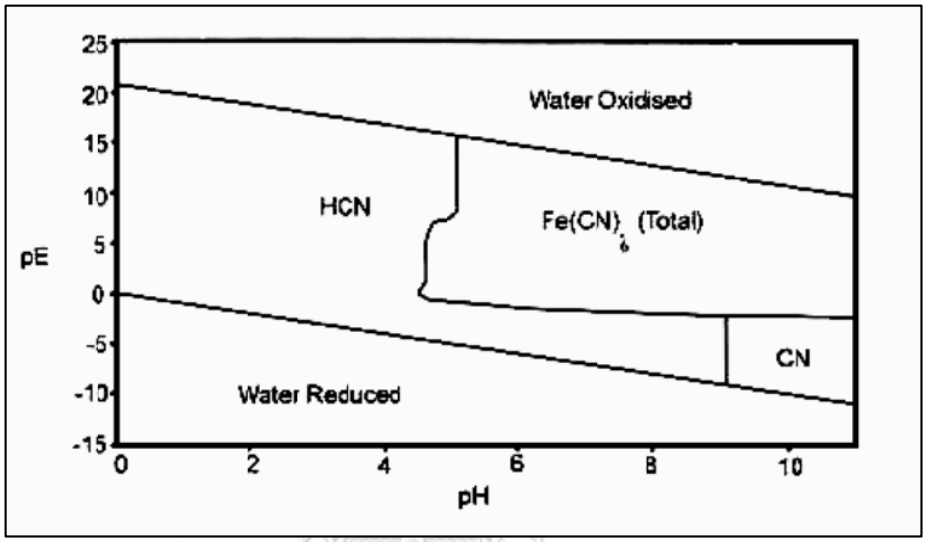
ในสภาวะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ไซยาไนด์จะอยู่ในสถานะที่เป็นได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของ Free Cyanide, Simple Cyanide หรือ Complex Cyanide ก็ได้ (Meehan, 2000) ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) สถานะของแข็ง

ไซยาไนด์ที่อยู่ในสถานะของแข็งจะอยู่ในรูปของ Complex Cyanide ซึ่งอาจจะเป็น Metallo Cyanide หรือ Alkaline Cyanide หรืออาจจะอยู่ในรูป Alkaline Metallic Cyanide นอกจากนี้อาจอยู่ในรูปของ Double Metallic Cyanide เช่น Tumbull's blue $Fe_3[Fe(CN)_6]^2$ และ Prussian Blue $Fe_4[Fe(CN)_6]^3$ ซึ่งเกิดได้ดีในช่วง pH ที่ค่อนข้างกว้าง และในสภาวะ Anoxic Condition

2) สถานะของเหลว

ในสภาวะที่เป็นของเหลว ไซยาไนด์อาจอยู่ในรูปของ Free Cyanide, Simple Cyanide หรือ Complex Cyanide ขึ้นอยู่กับค่า pH และ Redox Potential ของสารละลาย ถ้า pH ต่ำกว่า 9.2 ไซยาไนด์จะอยู่ในรูปไซยาไนด์ไอออน หรือไฮโดรเจนไซยานิก มีโลหะและธาตุต่าง ๆ มากมายเกิดเป็นสารประกอบกับไซยาไนด์ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ประเภทของสารประกอบไซยาไนด์ในสภาวะต่าง ๆ

ที่มา: Meehan, 2000

จากรูปแสดงให้เห็นว่า ถ้าสารละลายอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด และ Reducing Condition ไฮโดรเจนไซยาไนด์ จะเป็นสารประกอบหลักในสารละลาย ในขณะที่อยู่ในสภาวะที่เป็นกลางจนถึงสภาวะที่เป็นเบส และอยู่ในสภาวะ Oxidizing Condition เหล็กไซยาไนด์ (Ion Cyanide: $Fe(CN)_6$) จะเป็นสารประกอบหลักในสารละลาย และหากอยู่ในสภาวะที่เป็นเบสสูง และอยู่ในช่วง Reducing Condition นั้นสารประกอบไซยาไนด์จะอยู่ในรูปไซยาไนด์อิออน

3) สถานะของก๊าซ

ไฮโดรเจนไซยาไนด์ หรือไซยาไนด์อิออนที่อยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว สามารถเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกลางถึงกรดอ่อนไซยาไนด์อิออนจะกลายเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการระเหยได้ดีเมื่อสัมผัสกับอากาศ และเมื่อสารประกอบไซยาไนด์อยู่ในรูปของก๊าซจะมีความเป็นพิษสูงมาก

2.1.4 เสถียรภาพของสารประกอบไซยาไนด์

สารประกอบไซยาไนด์แต่ละชนิดมีเสถียรภาพต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับค่าคงที่เสถียรภาพ (Stability Constant) หรือค่าความเสถียรของสารประกอบ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ แสงแดด และอื่นๆ ดังรายละเอียดของข้อมูลดังนี้

1) เสถียรภาพของ Free Cyanide

Free Cyanide เป็นสารประกอบไซยาไนด์กลุ่มที่มีเสถียรภาพต่ำสุด ไซยาไนด์ไอออน จะเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้อย่างรวดเร็วเกือบ 100% (ดังตารางที่ 2.1) เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกลางถึงกรดอ่อน ก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์มีความเป็นพิษสูงส่งผลกระทบต่อระบบการหายใจ

ตารางที่ 2.1 ค่าความเสถียร (Stability Constant: log K) ของสารประกอบไซยาไนด์

สารเคมี	สูตรเคมี	ค่าความเสถียร (log K)
Hexacyanocobaltate	$[Co(CN)_6]^{3-}$	64.0
Hexacyanoferrate (III)	$[Fe(CN)_6]^{3-}$	43.6
Mercurycyanide	$[Hg(CN)_4]^{2-}$	41.4
Hexacyanoferrate (II)	$[Fe(CN)_6]^{4-}$	35.4
Tetracyanonickelate	$[Ni(CN)_4]^{2-}$	31.8
Tetracyanocuprate	$[Cu(CN)_4]^{3-}$	30.3
Tricyanocuprate	$[Cu(CN)_3]^{2-}$	23.5
Dicyanoargenate	$[Ag(CN)_2]^{-}$	21.0
Dicyanocuprate	$[Cu(CN)_2]^{-}$	18.8
Tetracyanozincate	$[Zn(CN)_4]^{2-}$	16.9
Tetracyanocadmiate	$[Cd(CN)_4]^{2-}$	16.8
Zinc Cyanamide	$Zn(CN)_2^{2-}$	11.1
Cadmium Cyanide	$Cd(CN)_2^{2-}$	11.0
Hexacyanomanganate	$[Mn(CN)_4]^{3-}$	9.7
Hydrogen Cyanide	HCN	9.2
Zinc Cyanide	$ZnCN^{+}$	5.3

ที่มา: US.EPA., 1994 และ Meehan, 2000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) เสถียรภาพของ Simple CyanideSimple Cyanide

เป็นสารประกอบไซยาไนด์กลุ่มที่มีเสถียรภาพค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเป็นสารประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ ทำให้เกิดไซยาไนด์ไอออนที่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้อย่างรวดเร็ว

3) เสถียรภาพของ Complex Cyanide

Complex Cyanide เป็นสารประกอบไซยาไนด์กลุ่มที่มีเสถียรภาพสูงกว่าสองกลุ่มแรกแต่ Weak Acid Dissociable Cyanide และ Moderately Strong Acid Dissociable Cyanide สามารถแตกตัวได้ง่ายเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดอ่อนๆ ส่วนกลุ่มของ Strong Acid Dissociable Cyanide ซึ่งเสมือนเป็นกลุ่มสารประกอบไซยาไนด์ที่มีความเป็นพิษน้อยที่สุด เนื่องจากค่อนข้างมีเสถียรภาพสูง แตกตัวได้ยาก แต่ก็สามารถแตกตัวให้ไซยาไนด์ไอออนได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดแก่หรือได้รับแสงอัลตร้าไวโอเลต

2.1.5 ไซยาไนด์ในสิ่งแวดล้อม

ไซยาไนด์เป็นสารประกอบที่เป็นส่วนประกอบในสิ่งมีชีวิต และผลิตภัณฑ์หลายชนิด ทำให้มนุษย์และสัตว์มีโอกาสสัมผัสไซยาไนด์ในชีวิตประจำวันค่อนข้างสูง แต่ด้วยความสมดุลของธรรมชาติ ทำให้เกิดกลไกต่างๆ เพื่อลดหรือทำลายพิษของไซยาไนด์ (International Cyanide Management Code, 2002) ดังนี้

1) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์ (Complexation)

ไซยาไนด์จะเกิดปฏิกิริยากับโลหะต่างๆ ได้สารประกอบเชิงซ้อนหรือไอออนที่มีเสถียรภาพสูงกว่าไซยาไนด์ไอออน และไฮโดรเจนไซยาไนด์ เช่น $Zn(CN)_4^{2-}$, $Cd(CN)_4^{2-}$, $Cd(CN)_3^-$, $Cu(CN)_2^-$, $Cu(CN)_3^{2-}$, $Ni(CN)_4^{2-}$ และ $Ag(CN)_2^-$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) การตกตะกอนเหล็กไซยาไนด์ (Precipitation)

เหล็กไซยาไนด์ (Ion Cyanide) จะเกิดการตกตะกอนกับโลหะอื่น เช่น เหล็ก ทองแดง นิกเกิล แมงกานีส ตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม ดีบุก และเงิน กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กไซยาไนด์ (Double Metallocyanide Complex) เช่น $Cu_2Fe(CN)_6$, $Ni_2Fe(CN)_6$, $Zn_2Fe(CN)_6$ และ $Fe_4[Fe(CN)_6]^3$

3) การดูดซับสารประกอบไซยาไนด์ (Adsorption)

สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในดิน เช่น อนุภาคของดินเหนียว เฟลด์สปาร์ ออกไซด์ของอะลูมิเนียม เหล็ก และแมงกานีส สามารถดูดซับไซยาไนด์ไว้ได้ เป็นการลดการแพร่กระจายหรือความรุนแรงของพิษ จากนั้นโดยกลไกการกำจัดพิษของธรรมชาติจะเกิดการสลายตัวของไซยาไนด์อย่างช้าๆ

4) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)

ไซยาไนด์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ไซยาเนท ซึ่งมีพิษน้อยกว่า ปฏิกิริยานี้จะเกิดได้ดีเมื่ออยู่ในสภาวะที่มี Strong Oxidizing Agent เช่น โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือไฮโปคลอไรต์ แต่การดูดซับไซยาไนด์ของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในดินจะช่วยกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในธรรมชาติได้

5) การเกิดไทโอไซยาเนท (Thiocyanate)

ไซยาไนด์จะทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของซัลเฟอร์อิสระหรือสารประกอบซัลเฟอร์ กลายเป็นไทโอไซยาเนทที่มีพิษน้อยกว่า

6) การระเหยของไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Volatilization)

การระเหยของไฮโดรเจนไซยาไนด์ สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสภาพที่เป็นสารละลาย และสภาพที่อยู่ในดิน เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง อุณหภูมิสูงขึ้น และมีการเติมอากาศเพื่อเพิ่มก๊าซออกซิเจน ถ้าเป็นการระเหยอย่างช้าๆ ก็จะไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้น

7) กระบวนการสลายตัวทางชีวภาพ (Biodegradation)

ไซยาไนด์สามารถเกิดการสลายตัวได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic Condition) และสภวะที่ไร้ออกซิเจน (Anaerobic Condition)

8) การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ไฮโดรเจนไซยาไนด์จะถูกไฮโดรไลซ์กลายเป็นกรดฟอร์มิก (Formic Acid) หรือแอมโมเนียม ฟอร์เมท (Ammonium Formate) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ แต่ก็สามารถเกิดได้ถ้าอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Aerobic Condition)

สำหรับปฏิกิริยาและกระบวนการต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติ ถ้าอยู่ในสภาวะที่เอื้ออำนวย และความเข้มข้นของไซยาไนด์ไม่สูงเกินไป จึงเป็นกลไกทางธรรมชาติเพื่อเพิ่มความสมดุลของสิ่งแวดล้อม

2.2 สารหนู (Arsenic)

สารหนู (Arsenic: As) เป็นธาตุกึ่งโลหะที่พบมากเป็นลำดับที่ 20 ของโลก เป็นสารที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากในด้านต่างๆ อาทิ ยารักษาเนื้อไม้ ยาฆ่าแมลง ส่วนผสมในอาหารสัตว์ เช่น ในอาหารสุกร และไก่ เพื่อเร่งการเจริญเติบโต ใช้เป็นเซมิคอนดักเตอร์ หรือใช้เป็นส่วนประกอบของยารักษาโรค แต่ทั้งนี้ สารหนูก็เป็นสารมีพิษต่อมนุษย์เช่นกัน เช่น ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินอาหาร เกิดอาการท้องร่วง และอุจจาระเป็นเลือด เป็นต้น (พิชญ์นิภา ขวัญเผือก และวลัยรัตน์ จันทรอัมพร, 2556)

2.2.1 แหล่งที่พบสารหนู

ในธรรมชาติสารหนูจะอยู่ในรูปของสารประกอบของหิน และแร่ต่างๆ เมื่อฝนตกทำให้มีการชะล้างของหิน และแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบกระจายลงสู่ชั้นดิน และน้ำใต้ดิน นอกจากนั้นสารหนูยังถูกใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ยาฆ่าแมลง การทำเหมือง การถลุงแร่โลหะ การย้อมผ้า การทำแก้ว การผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมหนัง และน้ำยาถนอมเนื้อไม้ เป็นต้น (ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและการจัดการภัยพิบัติ, 2558)

2.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารหนู

1) น้ำหนักอะตอม : 74.9

2) เลขอะตอม : 33

3) จุดเดือด : 615 องศาเซลเซียส

4) จุดหลอมเหลว : 818 องศาเซลเซียส

5) เลขออกซิเดชันที่เสถียร 4 รูปแบบ: −3, 0, +3 และ +5 แต่เมื่อปนเปื้อนอยู่ในน้ำจะมีเลขออกซิเดชันที่เสถียร 2 รูปแบบ คือ +3 และ +5

2.2.3 สารประกอบของสารหนู

1) สารประกอบอนินทรีย์ของสารหนู (Inorganic Form)

สารหนูอนินทรีย์สามารถพบได้ในดิน และสายแร่ผสมอยู่กับโลหะตัวอื่นๆ เช่น ในรูปของ Arsenopyrite (FeS_2•$FeAs_2$) และ Loellingite เป็นต้น เมื่อผ่านการถลุงแล้วจะได้เป็นแร่อาร์ซีนิก (Elemental Arsenic) ที่ไม่มีความเป็นพิษ และ Arsenic Trioxide ที่สามารถปะปนกับฝุ่นละอองในสิ่งแวดล้อมได้สารหนูอนินทรีย์สามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มได้แก่

1.1) สารประกอบเวเลนซ์สาม (Trivalent Compound) เช่น Arsenic Trioxide (As_2O_3) Sodium Arsenite ($NaAsO_2$) และ Arsenic trichloride ($AsCl_3$) เป็นต้น

1.2) สารประกอบเวเลนซ์ห้า (Pentavalent Compound) เช่น Arsenic Pentoxide (A_s2O_5) และ Arsenic Acid (H_3AsO_4) เป็นต้น

สารหนูทั้งสารประกอบเวเลนซ์สาม และสารประกอบเวเลนซ์ห้าส่วนใหญ่มักนำมาใช้เป็นส่วนผสมของสารกำจัดวัชพืช ยาฆ่าแมลง ยาเบื่อหนู สารป้องกันเนื้อไม้ ส่วนผสมของสีบางชนิด ผงซักฟอก รวมถึงยาบางชนิด นอกจากนี้ยังพบว่า สารหนูอนินทรีย์ชนิดเวเลนซ์สามจะมีความเป็นพิษเฉียบพลันมากกว่าสารหนูอนินทรีย์ชนิดเวเลนซ์ห้า

2) สารประกอบอินทรีย์ของสารหนู (Organic Form) ประกอบด้วย

2.1) สารหนูอินทรีย์ชนิดเวเลนซ์สาม (Trivalent, As^{3+}) เช่น Trimethylarsine [$(CH_3)_3As$], Dimethylarsine [$(CH_3)_2AsH$], Monosodium Methanearsonate (MSMA) และ

Disodium Methanearsonate (DSMA) ซึ่งสารประกอบเหล่านี้มักใช้เป็นส่วนประกอบในสารกำจัดวัชพืช และในรูปของ Thiacetarsamide (หรือ Sodium Carpasolate) ซึ่งเคยมีการนำมาใช้รักษาโรคพยาธิในหัวใจของสุนัข เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่า สารประกอบ MSMA, DSMA และ Thiacetarsamide สามารถทำให้เกิดอาการพิษคล้ายคลึงกับพิษที่เกิดจากสารหนูอนินทรีย์

2.2) สารหนูอินทรีย์ชนิดเวเลนซ์ห้า (Pentavalent, As^{5+}) เช่น Dimethylarsenic Acid, Disodium Methylarsenate, Arsanilic Acid, Sodium Arsanilate และ 3-Nitro, 4-Hydroxypheylsonic Acid มักถูกนำมาใช้เป็นสารเร่งการเจริญเติบโต โดยมากพบในอาหารไก่ และสุกร เป็นต้น

2.2.4 การสะสมในพืชและการแสดงความเป็นพิษต่อพืช

สารหนูไม่ใช่ธาตุจำเป็นต่อพืช หากในพืชมีความเข้มข้นเพียง 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ก็จะแสดงความเป็นพิษต่อพืช (Virender และ Mary, 2009) พืชจะดูดดึงสารหนูจากดินที่ปนเปื้อนแล้วลำเลียงเคลื่อนย้ายเข้าสู่ต้นพืช และสะสมในส่วนต่างๆ เช่น หัวราก ลำต้น ใบ โดยจะไม่มีกลไกการย่อยสลายสารพิษ (Sakakibara และคณะ, 2010) สารหนูที่สะสมในพืชจะเข้าไปแทรกแซงกระบวนการเมทาบอลีซึม ส่งผลให้มวลชีวภาพลดลง ราก และความยาวหน่อมีมวลลดลง รวมทั้งความสูงของลำต้น ความยาวของหน่อ อัตราการงอก และผลผลิต ส่งผลให้พืชตายในที่สุด ทั้งนี้ได้มีการทดสอบในพืชหลายชนิด เช่น พบมะเขือเทศมีการเปลี่ยนแปลงใบและราก ข้าวมีสรีระผิดรูป และเมล็ดข้าวมีจำนวนลดลง รวมทั้งพบข้าวสาลีมีน้ำหนักของรากและหน่อลดลงด้วย (Ahmed และคณะ, 2006) นอกจากนั้นยังทำลายเซลล์ และเนื่อเยื่อคลอโรพลาสต์ ส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.5 ความเป็นพิษต่อมนุษย์

อาการพิษเฉียบพลัน ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่ออวัยวะที่สัมผัสกับสารหนู และอาจทำให้คลื่นไส้ อาเจียนเป็นตะคริว กล้ามเนื้อเกร็ง อาการแทรกซ้อนเกี่ยวกับการทำงานของหัวใจ และเสียชีวิตจากหัวใจทำงานล้มเหลว

อาการพิษเรื้อรัง หากได้รับสารหนูติดต่อกันเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดแผลเป็นหรือเป็นรูที่ช่องจมูก ผิวหนังหนาขึ้น มีรอยด่างดำที่ผิวหนัง อาจมีเส้นสีขาวบนเล็บ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดอาการชาตามปลายมือปลายเท้า ในบางรายที่เป็นมากอาจมีอาการกล้ามเนื้ออ่อนแรงร่วมด้วย สารหนูมีสมบัติเป็นสารก่อกลายพันธุ์ ก่อมะเร็งผิวหนัง มะเร็งปอด รวมทั้งมีผลต่อทารกในครรภ์ (เกศ สัตยพงศ์, 2555)

2.3 แมงกานีส (Manganese)

แมงกานีส (Manganese: Mn) เป็นธาตุโลหะชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่มธาตุทรานสิชันหมู่ VIII B คาบที่ 4 ในตารางธาตุ จัดเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมโลหะ รวมถึงเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่อพืช สัตว์ และร่างกายมนุษย์ (ยุภาพันธ์ ทองไทย, 2552)

2.3.1 แหล่งที่พบแมงกานีส

แมงกานีสสามารถพบได้ในธรรมชาติ แต่มักเกิดอยู่ร่วมกันกับธาตุอื่น ๆ แมงกานีสกระจายอยู่ตามเหมืองแร่ โรงงานถลุงแร่แมงกานีส โรงงานผลิตโลหะผสม โรงงานเชื่อมโลหะด้วยไฟฟ้า และโรงงานทำถ่านไฟฉาย ส่วนมากมักอยู่ในรูปของแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2)

2.3.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแมงกานีส

1) ชื่อภาษาอังกฤษ : Manganese
2) สัญลักษณ์ : Mn
3) เลขอะตอม : 25
4) น้ำหนักอะตอม : 54.938
5) จุดหลอมเหลว : 1,240 องศาเซลเซียส
6) จุดเดือด : 2,097 องศาเซลเซียส
7) เลขออกซิเดชัน : +3
8) รัศมีไอออน : 0.66 อังสตรอม
9) เลขออกซิเดชัน : +2
10) รัศมีไอออน : 0.80 อังสตรอม
11) รัศมีอะตอมเท่า : 1.17 อังสตรอม
12) ความหนาแน่น : 7.44 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.3 การสะสมในพืชและการแสดงความเป็นพิษต่อพืช

แมงกานีสจัดเป็นธาตุอาหารรองของพืช เป็นหนึ่งในจำนวน 5 ธาตุที่พืชชั้นสูงส่วนใหญ่ต้องการเพียงเล็กน้อย (Trace elements) อีก 4 ธาตุ ได้แก่ โบรอน สังกะสี ทองแดง และโมลิบดีนัม พืชจะดูดดึงแมงกานีสในรูป Mn^{2+} เหตุผลประการหนึ่งที่ธาตุนี้จำเป็นสำหรับพืชเพราะเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่จำเป็นสำหรับเอนไซม์บางชนิด ช่วยรักษาโครงสร้างของระบบเมมเบรนภายในคลอโรพลาสต์ และมีบทบาทในกิจกรรมกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (พรพิมล สุริยภัทร, 2552) พืชที่ขาดแมงกานีสจะเกิดอาการผิดปกติหลายอย่าง ที่สำคัญชนิดหนึ่งเรียกว่า Intervenal Chlorosis เนื่องจากขาดคลอโรฟิลล์ จะแสดงอาการคลอโรซิส (Chlorosis) คือ ใบจะมีสีเหลืองหรือสีขาวในบริเวณระหว่างเส้นใบ (Vein) และจะแห้งกลายเป็นสีน้ำตาลหรือสีเทาดำ (ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์,

2540) แต่หากแมงกานีสมีมากเกินไปในดิน จะเกิดความเป็นพิษต่อพืช และขาดความสมดุลกับธาตุอื่นๆ ได้แก่ การเจริญเติบโตลดลง ใบพืชมีจุดสีน้ำตาล ซึ่งเด่นชัดมากหากพืชได้รับแสงที่มีระดับความเข้มสูง รอยด่างจากพิษของแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) จะมีสีน้ำตาลเกิดจากพอลิฟีนอลรูปออกไซด์ ซึ่งเป็นอาการเหมือนการขาดธาตุเหล็ก และจะพบในสภาวะที่มีความเป็นกรดอย่างแรง (นวรัตน์ อุดมประเสริฐ, 2558)

2.3.4 ความเป็นพิษต่อมนุษย์

อาการพิษเฉียบพลัน ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่ออวัยวะที่สัมผัสกับแมงกานีส และอาจแสบร้อน ปวดศีรษะ ลิ้นรู้สึกรสโลหะ คลื่นไส้ หายใจขัด เจ็บหน้าอก การสัมผัสในรูปอนุภาคที่เป็นของแข็งของแมงกานีสไดออกไซด์ ทำให้เกิดโรคไข้ไอโลหะ (Metal Fume Fever) จะมีอาการไข้สูง แน่นหน้าอก และหอบเหนื่อย

อาการพิษเรื้อรัง ระบบที่จะได้รับผลกระทบมากที่สุดคือ ระบบประสาท สารแมงกานีสจะเข้าสะสมในสมองส่วน Globus Pallidus ทำให้เกิดอาการทางสมอง โดยอาการระยะแรกจะอ่อนเพลีย ปวดศีรษะ พฤติกรรมเปลี่ยนแปลง เช่น กระวนกระวาย พูดมากผิดปกติ รวมเรียกว่า Manganese Psychosis อาการทางจิตนี้ ซึ่งบางครั้งอาจทำให้สับสนกับคนเป็นโรคจิตเภท (คนบ้า) ได้ ในระยะรุนแรงจะมีอาการคล้ายคนเป็นโรคพาร์กินสัน (Parkinsonism) เรียกว่า กลุ่มอาการ Manganism คือ พูดช้า หน้าตาดูไม่มีความรู้สึก เคลื่อนไหวช้า กระตุก และท่าเดินผิดปกติ (วิวัฒน์ เอกบูระวัฒน์, 2555)

2.4 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของพืชใบเลี้ยงคู่และใบเลี้ยงเดี่ยว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.4.1 กระถินเทพา

กระถินเทพา มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Acacia mangium* Willd. มีถิ่นกำเนิดตามธรรมชาติอยู่ในรัฐควีนส์แลนด์ ประเทศออสเตรเลีย แถบตะวันตกเฉียงใต้ ประเทศปาปัวนิวกินี และหมู่เกาะโมลัคคาส์ ประเทศอินโดนีเซีย โดยพบขึ้นอยู่ทั่วไปในเขตติดต่อระหว่างป่าชายเลน และแนวป่าไม้พุ่มเตี้ย ตลอดจนป่าตามริมฝั่งแม่น้ำ และทุ่งหญ้าต่าง ๆ ไม่พบขึ้นในป่าดิบชื้นที่มีไม้ใหญ่ขึ้นหนาแน่น แต่มีขึ้นบ้างตามแนวชายป่าที่มีแสงแดดส่องถึง กระถินเทพาจัดเป็นไม้เบิกนำชนิดหนึ่ง ที่สามารถปรับตัวเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ซึ่งสภาพแวดล้อมถูกทำลาย ดังนั้นจึงมีการนำไปปลูกเป็นสวนป่าในหลายประเทศ เช่น มาเลเซีย ปาปัวนิวกินี เนปาล ฟิลิปปินส์ และบังคลาเทศ เป็นต้น สำหรับประเทศไทยเริ่มมีการนำเข้ามาปลูกในปีพ.ศ. 2523 (กรมป่าไม้, 2553) ดังรูปที่ 2.3

รูปที่ 2.3 ต้นกระถินเทพา
ที่มา: กรมป่าไม้, 2553

1) ลักษณะทางพฤกษ์ศาสตร์

กระถินเทพาเป็นพรรณไม้เบิกนำที่มีการเติบโตเร็ว มีความสูงเมื่อโตเต็มที่มากกว่า 15 เมตร และสามารถเจริญเติบโตได้สูงถึง 30 เมตร ดังรายละเอียดส่วนต่างๆ ของกระถินเทพาในรูปที่ 2.4 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.1) ลำต้น มีลำต้นตรง และไม่ค่อยแตกกิ่งแขนง ทั้งนี้เนื่องจากกระถินเทพามีลักษณะพิเศษ คือ ลิดกิ่งได้เองตามธรรมชาติ โดยกิ่งส่วนล่างจะทยอยแห้งตายไปตั้งแต่อายุยังน้อย ทรงพุ่มของต้นกระถินเทพาจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมโดยจะมีพุ่มกว้างถ้าปลูกห่างหรือขึ้นอยู่ในบริเวณที่โล่ง และจะสูงโปร่งถ้าปลูกชิดกันในสภาพของสวนป่า ลำต้นเมื่ออายุมากจะมีเปลือกแข็งหนา ขรุขระ และแตกเป็นร่องตามยาวเป็นสีเขียวอมน้ำตาล

1.2) ใบ ในระยะที่เป็นต้นอ่อน กระถินเทพาจะมีใบจริงประเภทใบรวม ซึ่งประกอบด้วยใบย่อยหลายๆ ใบ คล้ายใบของกระถิน แต่เมื่อมีอายุได้ 2-3 สัปดาห์ กระถินเทพาจะสร้างใบเทียม (Phyllode) ที่มีลักษณะเป็นใบเดี่ยว มีเส้นใบแบบขนานขึ้นมาแทนใบจริง โดยใบเทียมดังกล่าวนี้เป็นส่วนของก้านใบ และแกนกลางของใบรวมที่ขยายตัวแผ่กว้างออกไป จนมีลักษณะคล้ายแผ่นใบของพืชทั่ว ๆ ไป

1.3) ดอก เป็นดอกรูปทรงกระบอกแบบหางกระรอก ช่อดอกแต่ละช่อประกอบด้วยดอกเล็ก ๆ เป็นจำนวนมาก มีสีขาว จนถึงสีครีม หรือเหลือง ผลมีลักษณะเป็นฝักสีเขียว เมื่อแก่เป็นสีน้ำตาลดำ บิดงอ และขยุ้มเป็นกระจุก

1.4) ผลและเมล็ด ฝักอ่อนมีสีเขียว ฝักแก่มีสีน้ำตาลเข้ม มีลักษณะบิดไปมาเป็นกลุ่มก้อนแน่น เมื่อแก่มีสีน้ำตาลเข้ม เมื่อแก่เต็มที่จะแตกปริตามตะเข็บ เมล็ดแก่มีสีดำขนาด 3-5 มิลลิเมตร เกิดเรียงไปตามความยาวของฝัก และยึดติดกับฝักด้วยรก (Funicle) ซึ่งมีสีเหลืองสดจะห้อยติดอยู่กับใยสีส้ม ภายในระยะไม่กี่วันโดยเฉพาะถ้ามีลมแรงใยจะหลุดออกจากฝัก และเมล็ดที่ติดอยู่กับใยจะร่วงหล่นสู่พื้นดิน ใยที่มีสีส้มจัดนี้เป็นที่สนใจของสัตว์จำพวกมด และนกต่าง ๆ ซึ่งเป็นการช่วยในการแพร่กระจายหรือการขยายพันธุ์โดยเมล็ด

1.5) เนื้อไม้ มีส่วนกระพี้บาง สีเหลืองอ่อน แก่นมีสีน้ำตาล มีคุณสมบัติแข็ง และทนทาน

(1) ลำต้นและเนื้อไม้

(2) ใบ

(3) ดอก

(4) ผลและเมล็ด

รูปที่ 2.4 ลักษณะส่วนต่าง ๆ ของกระถินเทพา

ที่มา: กรมป่าไม้, 2553

2) สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการปลูก

กระถินเทพาสามารถเจริญเติบโตได้ดีในทุกพื้นที่ มักขึ้นอยู่ในพื้นที่สูงไม่เกิน 800 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง เป็นพรรณไม้ที่ต้องการพื้นที่ที่มีความชื้นสูง มีปริมาณน้ำฝนมาก แต่โดยทั่วไปจะขึ้นในพื้นที่ที่มีอากาศร้อนชื้น สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพดินหลายชนิด เช่น ดินที่มีหินปะปน ดินที่ถูกชะล้างมาก่อนซึ่งมีความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำ และยังขึ้นได้ดีในดินลึกที่เกิดจากการสลายตัวของวัตถุต้นกำเนิดดินหรือดินที่เกิดจากการทับถมของตะกอนในบริเวณที่ลุ่ม นอกจากนั้น กระถินเทพายังมีความต้องการแสงแดดจัด ดังนั้น จึงไม่ควรปลูกพืชชนิดนี้ในที่มีร่มเงา เพราะจะทำให้ต้นแคระแกร็น ผอมชะลูด และไม่แข็งแรง

3) การขยายพันธุ์

3.1) แบบอาศัยเพศ เป็นการขยายพันธุ์โดยใช้เมล็ด

3.2) แบบไม่อาศัยเพศ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การโน้มกิ่ง การตอนกิ่ง การต่อกิ่ง การติดตา การปักชำ การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อและการแตกหน่อ เป็นต้น

4) การเจริญเติบโต

กระถินเทพามีอัตราการเติบโตเร็ว รอบตัดฟันสั้น มูลค่าของเนื้อไม้ต่ำ (คณะวนศาสตร์, 2554) กระถินเทพามีความเพิ่มพูนเฉลี่ยรายปีสูง โดยความเพิ่มพูนเฉลี่ยรายปีของความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าระหว่าง 1.90-3.10 เมตร/ปี และ 1.82-2.64 เซนติเมตร/ปี ตามลำดับ ซึ่งขึ้นอยู่กับศักยภาพของพื้นที่ โดยผลผลิตเมื่อปลูกด้วยความหนาแน่นที่แตกต่างกันจะทำให้มีมวลชีวภาพต่อพื้นที่ต่างกันตามจำนวนต้นในพื้นที่ โดยแปลงที่มีจำนวนต้นมากกว่าจะมีมวลชีวภาพต่อพื้นที่มากกว่า (บุญณรงค์ ธานีรัตน์, 2538) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ได้แก่ ระยะปลูกแล้ว และอายุของต้นไม้ที่มีผลต่อมวลชีวภาพด้วย เป็นต้น อย่างไรก็ตามมวลชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อต้นไม้อายุมากขึ้น และเมื่อ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เปรียบเทียบความเพิ่มพูนเฉลี่ยรายปีของมวลชีวภาพเหนือดินของกระถินเทพา พบว่า มีค่าแปรผันตามศักยภาพของพื้นที่ โดยกระถินเทพาที่ปลูกในพื้นที่เหมาะสมมาก เหมาะสมปานกลาง และเหมาะสมน้อย มีความเพิ่มพูนเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 3.06, 2.22 และ 2.01 ตัน/ไร่/ปี ตามลำดับ

5) การนำไปใช้ประโยชน์

1) กระถินเทพาเป็นไม้โตเร็วที่เหมาะสำหรับนำมาทำไม้แปรรูป ทำเฟอร์นิเจอร์ไม้ โครงสร้างต่าง ๆ ที่ไม่ต้องรับน้ำหนักมากนัก เช่น ไม้อัด และเยื่อกระดาษ เป็นต้น

2) ใช้เป็นไม้ฟืนได้ดี ถึงแม้ว่าการปลูกไม้ชนิดนี้จะไม่เน้นเพื่อเป็นเชื้อเพลิง หากแต่เป็นไม้ที่มีความหนาแน่น และค่าความร้อนสูง 4,800 - 4,900 แคลอรี่/กรัม

3) เยื่อไม้กระถินเทพาที่ผ่านการฟอกแล้ว นำไปผลิตเป็นกระดาษชนิดสี เช่น กระดาษเขียนหนังสือ เพราะมีคุณภาพใกล้เคียงกับเยื่อที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัส

4) ใบสามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ในยามขาดแคลน และใช้เป็นแหล่งให้น้ำหวานสำหรับการเลี้ยงผึ้งได้เป็นอย่างดี เนื่องจากบริเวณโคนใบของกระถินเทพามีต่อมน้ำหวาน

5) ช่วยปรับปรุงดิน เนื่องจากเป็นพืชตระกูลถั่ว มีแบคทีเรียจำพวกไรโซเบียม อาศัยอยู่บริเวณราก ซึ่งแบคทีเรียดังกล่าวมีความสามารถในการตรึงก๊าซไนโตรเจนในบรรยากาศมาอยู่ในดินและเปลี่ยน ให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จึงเป็นการเพิ่มไนโตรเจนในดิน

6) ปลูกเพื่อใช้เป็นร่มเงาหรือเป็นไม้ประดับ เป็นพืชคลุมดิน และแนวกันลม

2.4.2 กระถินยักษ์

กระถินยักษ์มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Leucaena leucocephala* (Lam.) มีถิ่นกำเนิดตามธรรมชาติอยู่ในทวีปอเมริกากลาง ทางตอนใต้ของประเทศเม็กซิโก แต่มีการปลูกกระจายทั่วไปในประเทศเขตร้อน โดยเชื่อว่ามีการนำเข้ามาปลูกในประเทศฟิลิปปินส์ตั้งแต่คริสต์ศตวรรษที่ 16 เพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ (ดังรูปที่ 2.5) ปัจจุบันมีการปลูกอย่างกว้างขวางในประเทศไทย เพื่อเป็นไม้พลังงาน โดยกระถินยักษ์มีมากกว่า 100 สายพันธุ์ บางสายพันธุ์เป็นไม้ยืนต้น บางสายพันธุ์เป็นไม้พุ่ม เนื่องจากกระถินยักษ์สามารถกระจายพันธุ์ได้กว้างขวาง จึงมีความแตกต่างกันอย่างมากในเรื่องขนาดและรูปร่างทั้งนี้สามารถจำแนกพันธุ์กระถินยักษ์ออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่ม คือ

1) พันธุ์ฮาวาย เป็นพันธุ์ไม้พุ่มเตี้ย สูงประมาณ 5 เมตร ออกดอกขณะที่ต้นยังอ่อน และมักออกดอกตลอดปีมากกว่าจะออกเป็นฤดู

2) พันธุ์ซัลวาเดอร์ เป็นไม้ยืนต้น สูงประมาณ 20 เมตร มีใบ ฝัก และเมล็ดใหญ่ ไม่มีกิ่งก้าน ออกดอกไม่สม่ำเสมอ และไม่มีฤดูที่แน่นอน โดยจะให้ดอกนาน ๆ ครั้ง อาจเรียกว่า พันธุ์กัวเตมาลาหรือกระถินยักษ์ฮาวาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3) พันธุ์เปรู เป็นต้นไม้สูง 15 เมตร คล้ายพันธุ์ซัลวาเดอร์ แต่มีกิ่งก้านใหญ่ตรงส่วนล่างของลำต้น ลำต้นขนาดเล็ก และให้ปริมาณใบตามกิ่งก้านสูงมาก การออกดอกจะให้ดอกนาน ๆ ครั้ง

รูปที่ 2.5 ต้นกระถินยักษ์

ที่มา: โครงการประเทศสีเขียว, 2559

1) ลักษณะทางพฤกษ์ศาสตร์

กระถินยักษ์เป็นพรรณไม้ยืนต้นขนาดกลางที่มีการเจริญเติบโตเร็ว มักแตกเป็นพุ่ม ความสูงเมื่อโตเต็มที่ประมาณ 10 เมตร ดังรูปที่ 2.6 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1.1) ลำต้น เป็นไม้ขนาดกลาง มีลำต้นเรียบ เปลือกบางสีเทาปนน้ำตาลแดง

1.2) ใบ เป็นแบบประกอบ และมีใบตลอดปี ใบย่อยแตกออกจากก้านใบ 3-10 คู่ ใบย่อย 5-20 คู่ ใบรูปขอบขนาน ปลายใบแหลมทำมุมกว้าง และไม่มีขน

1.3) ดอก ดอกมีสีขาว ออกเป็นช่อแบบกระจุกตามซอกใบ และปลายกิ่ง เกิดรวมเป็นจุก เมื่อแก่จะมีสีน้ำตาล ช่อดอกหนึ่ง ๆ จะมีฝักประมาณ 15-20 ฝัก ออกดอกในช่วงเดือนมกราคม และฝักจะแก่ในช่วงกุมภาพันธ์ถึงมีนาคม

1.4) ผลและเมล็ด ฝักเกิดเป็นกลุ่ม ๆ มีลักษณะบาง ๆ แบนและตรง มีสีเขียวเข้มและกลายเป็นสีแดงหรือสีน้ำตาลเมื่อแก่เต็มที่ ในฝักแก่จะมีเมล็ดอยู่ประมาณ 15-30 เมล็ด รูปร่างแบนรี

1.5) เนื้อไม้ กระพี้จะมีสีจางกว่าส่วนที่เป็นแก่น เนื้อไม้มีสีเหลืองอ่อนจนถึงสีน้ำตาลอ่อน เสี้ยนตรง เนื้อไม้ค่อนข้างแข็ง สามารถตัดและเลื่อยได้ และให้ค่าความร้อนสูงโดยมีค่าความร้อนถึง 4,157 แคลอรี/กรัม

(1) ลำต้นและเนื้อไม้ (2) ใบ (3) ดอก (4) ผล

รูปที่ 2.6 ลักษณะส่วนต่าง ๆ ของกระถินยักษ์

ที่มา: โครงการประเทศสีเขียว, 2559

2) สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการปลูก

กระถินยักษ์สามารถขึ้นได้ในทุกสภาพพื้นที่ แม้ในพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ เช่น ในพื้นที่ที่มีความแห้งแล้ง หรือในพื้นที่ที่มีน้ำท่วมเป็นระยะ โดยไม่ต้องการสภาพดินที่อุดมสมบูรณ์มากนัก เติบโตได้ดีในที่สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางไม่เกิน 500 เมตร และขึ้นได้ดีในพื้นที่ที่เป็นหินปูน สภาพอากาศควรมีความชื้นปานกลาง

3) การขยายพันธุ์

3.1) แบบอาศัยเพศ เป็นการขยายพันธุ์โดยใช้เมล็ด ซึ่งเป็นที่นิยมมากที่สุด และใช้กันอย่างแพร่หลายในการปลูกสร้างสวนป่า เนื่องจากขยายพันธุ์ได้ง่าย เหมาะสมแก่การปฏิบัติ ราคาไม่แพง พืชที่เกิดจากเมล็ดมีอายุยืนนาน เมล็ดที่เก็บในสถานที่เหมาะสมจะเก็บไว้ได้หลายปี นำไปเพาะปลูกในฤดูกาลต่อไปได้

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

4) การเจริญเติบโต

กระถินยักษ์มีอัตราการเติบโตเร็ว รอบตัดฟันสั้น มูลค่าของเนื้อไม้ต่ำ แต่อัตราการเติบโตจะช้าลงเมื่อนำไปปลูกในพื้นที่ที่ไม่เหมาะสม จากการรวบรวมข้อมูลการเจริญเติบโต พบว่า กระถินยักษ์ที่ปลูกในพื้นที่ที่มีความเหมาะสมมาก เหมาะสมปานกลาง และเหมาะสมน้อย มีค่าความเพิ่มพูนเฉลี่ยรายปีของความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 2.11-1.69 เมตร/ปี และ 1.63-1.09 เซนติเมตร/ปี และ 1.28-0.90 เซนติเมตร/ปี ตามลำดับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับศักยภาพของพื้นที่ ในขณะที่มวลชีวภาพเหนือดินของกระถินยักษ์ในพื้นที่เหมาะสมมากเท่ากับ 2.66 ตัน/ไร่/ปี และเหมาะสมปานกลางเท่ากับ 1.97 ตัน/ไร่/ปี แต่ในพื้นที่เหมาะสมน้อยมีค่าต่ำมากเพียง 0.32 ตัน/ไร่/ปี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5) การใช้ประโยชน์

5.1) กระถินยักษ์สามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ เช่น ใช้เป็นอาหารของวัว ควาย แพะ แกะ เป็ด ไก่ นอกจากนั้นมนุษย์ยังรับประทานยอดอ่อน และฝักอ่อน เมล็ดใช้ปรุงอาหารเหมือนกับถั่วเขียว

5.2) ใช้ทำไม้แปรรูป ปาเก้ เสา เนื้อไม้มีรายละเอียดง่ายต่อการตัด และเลื่อย

5.3) ทำเยื่อกระดาษ เนื่องจากมีลิกนินต่ำ แต่มีไฟเบอร์สั้นกว่าไม้สน กระดาษที่ทำจากกระถินยักษ์มีความแข็งแรงต่อการฉีกขาดและการพับต่ำ แต่มีกำลังต่อต้านแรงดึง มีความทึบสูง เหมาะสำหรับใช้ประโยชน์ในการพิมพ์และเป็นกระดาษเขียน

5.4) ไม้เพื่อพลังงาน เนื่องจากมีการเจริญเติบโตรวดเร็ว ให้ผลผลิตสูง และสามารถตัดแตกหน่อได้ง่าย โดยสามารถตัดเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานชีวมวลเมื่ออายุ 1-2 ปี

5.5) ช่วยปรับปรุงดิน เนื่องจากเป็นพืชตระกูลถั่ว มีแบคทีเรียจำพวกไรโซเบียมอาศัยอยู่บริเวณราก ทำให้เพิ่มไนโตรเจนในดิน

2.4.3 หญ้าแฝก

หญ้าแฝก (อังกฤษ:Vetiver Grass; ชื่อวิทยาศาสตร์: *Vetiveria zizanioides*) เป็นพืชที่มีระบบรากลึก และแผ่กระจายลงไปในดินตรงๆ เป็นพืชที่มีอายุได้หลายปี ขึ้นเป็นกอแน่น มีใบเป็นรูปขอบขนานแคบปลายสอบแหลม ยาว 35-80 เซนติเมตร มีส่วนกว้าง 5-9 มิลลิเมตร สามารถขยายพันธุ์ที่ได้ผลรวดเร็ว โดยการแตกหน่อจากลำต้นใต้ดิน ในบางโอกาสสามารถแตกแขนง และรากออกในส่วนของก้านช่อดอกได้ เมื่อหญ้าแฝกโน้มลงดินทำให้มีการเจริญเติบโตเป็นกอหญ้าแฝกใหม่ได้ หญ้าแฝกมีอยู่ 3 สายพันธุ์ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2543) (ดังรูปที่ 2.7) คือ

1) หญ้าแฝกดอน รากไม่มีกลิ่น ใบโค้งงอ สูงประมาณ 100-150 เซนติเมตร ได้แก่ พันธุ์ราชบุรีประจวบคีรีขันธ์ ร้อยเอ็ด กำแพงเพชร 1 นครสวรรค์และเลย

2) หญ้าแฝกลุ่ม ได้แก่ พันธุ์สุราษฎร์ธานี กำแพงเพชร 2 ศรีลังกา สงขลา 3 และพระราชทาน เป็นต้น

3) หญ้าแฝกหอม มีรากที่มีกลิ่นหอม ใบยาวตั้งตรง สูงประมาณ 150-200 เซนติเมตร

รูปที่ 2.7 ก) แฝกลุ่ม ข) แฝกดอน และ ค) แฝกหอม

ที่มา: กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2558

1) ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

หญ้าแฝกจะเจริญเติบโตแตกหน่อขึ้นเป็นกอ ๆ รูปร่างคล้ายหญ้าทั่ว ๆ ไป เช่น กอตะไคร้ ทรงพุ่มใบปรกดินหรือทรงสูง ลำต้นตั้งตรง และย่างปล้องชูช่อดอก บางครั้งอาจสูงถึง 3 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางกอที่โตเต็มที่ซึ่งมีอายุหลายปี อาจกว้างถึง 75 เซนติเมตร กอประกอบด้วยต้นหญ้าแฝกซึ่งมีลักษณะแบนเนื่องจากเป็นส่วนประกอบของกาบใบหุ้มห่อโคนต้น จะขึ้นเบียดเสียดกันแน่น ส่วนลำต้นจะอยู่เหนือผิวดินเพียงเล็กน้อย และจะสอดประสานกันอย่างหนาแน่น ส่วนกลางกอจะมีลักษณะโหย่งเป็นรูปโดม เนื่องจากเป็นส่วนลำต้นของหญ้าแฝกที่มีอายุมากที่สุด หญ้าแฝกมีการขยายกอโดยการแตกหน่อรอบ ๆ ต้นเดิม ทับซ้อนกันและขยายเป็นกอใหญ่ โดยใช้ไหล (Stolon) การที่หญ้าแฝกขึ้นเบียดเสียดกันแน่น และแข็งแรงนี้จึงเป็นลักษณะที่ดีเมื่อปลูกติดต่อกันเป็นแนวรั้วจะสามารถดักตะกอนดินได้ เมื่อระดับตะกอนดินที่ตกทับถมด้านหน้าแถวหญ้าแฝกสูงขึ้น หญ้าแฝกจะเริ่มแตกกอที่ข้อที่ถูกดินทับถม และตั้งกอใหม่ให้มีระดับสูงขึ้นเหนือผิวดินเสมอ จึงทำให้แถวหญ้าแฝก หรือแนวรั้วหญ้าแฝกมีการยกตัวสูงขึ้นเรื่อย ๆ ส่วนรากก็จะงอกจากข้อของลำต้นเช่นเดียวกัน และยึดดินที่ทับถมขึ้นมารอบ ๆ โคนต้นเดิมให้แข็งแรงมั่นคง

ช่อดอกจะอยู่บนก้านช่อดอกซึ่งสูงประมาณ 1.50 เมตร หรืออาจสูงถึง 2 เมตร ช่อดอกหญ้าแฝกจะกางออกเป็นรูปฉัตร ความยาวประมาณ 30 เซนติเมตร ฐานกว้าง 15 เซนติเมตร ช่อดอกจะมีสีน้ำตาล น้ำตาลแดง เทา หรือสีขาวนวล ทั้งนี้เนื่องจากเป็นสีของส่วนประกอบที่เป็นก้านช่อดอก แขนง ช่อดอก กลีบดอก เกสรตัวผู้ และเกสรตัวเมีย ซึ่งจะมีตั้งแต่สีม่วงแดงถึงสีขาว หากส่วนประกอบทั้งหมดมีสีเดียวกัน เช่น สีม่วงแดงก็จะเห็นช่อดอกเป็นสีม่วงแดง หากเป็นสีขาวทั้งช่อจะเห็นเป็นสีขาวนวล หากแต่มีสีคละกัน เช่น ก้านช่อดอกมีสีม่วง เกสรตัวผู้สีขาว เกสรตัวเมียสีม่วงเข้ม กลีบดอกสีม่วงอ่อนช่อดอกจะมีสีเทา หรือสีกะปิ เป็นต้น สำหรับลักษณะช่อดอกของหญ้าแฝก ดอกหญ้าแฝกจะอยู่บนแขนงช่อดอกโดยอยู่เป็นคู่ดอกบนมีก้านดอก ดอกล่างไม่มีก้านดอก ดอกบนเป็นดอกตัวผู้ คือ มีเกสรตัวผู้ ดอกล่างเป็นดอกกระเทย คือ มีทั้งเกสรตัวผู้ และเกสรตัวเมียเป็นดอกที่มีการผสมติดเมล็ด ดอกบนค่อนข้างจะเล็กเรียว บางครั้งจะเปลี่ยนรูปร่างเป็นรูปกลมคล้ายหัวเข็มหมุดที่มีส่วนบนแหลม เข้าใจว่าเป็นดอกที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ ดอกหญ้าแฝกจะบานเพื่อผสมเกสรอยู่ 4-5 วัน ส่วนที่ผสมเกสรก่อนจะอยู่บนยอดของช่อหลังผสมเกสรแขนงจะเริ่มหุบตั้งแต่ปลายช่อดอกลงมาจนถึงโคนช่อ และเมล็ดเริ่มแตกรวง ซึ่งใช้เวลา 8-10 วันเมล็ดจะเริ่มแก่และร่วง ซึ่งใช้ เวลาประมาณ 10-12 วัน เมื่อร่วงหมดแล้วจะเหลืออยู่เฉพาะก้านช่อดอก เมล็ดมีลักษณะกลมยาวคล้ายเมล็ดข้าวเปลือกจะมีหนามเล็ก ๆ เรียงเป็นแถวคล้ายหนามเล็ก ๆ ที่เรียงเป็นแถว ซึ่งหนามเล็ก ๆ นี้จะเรียงตามขอบใบ สีของเมล็ดจะมีสีเดียวกับ กลีบดอก สีน้ำตาลปนเทา เมล็ดหญ้าแฝกสามารถงอกได้แต่ไม่มากนัก และมีการพักตัว หากเก็บเมล็ดไว้ตั้งแต่ 1-6 เดือน เมล็ดจะมีความงอกเฉลี่ย 1-34 เปอร์เซ็นต์ ต้นกล้าที่งอกจากเมล็ด

จะมีความอ่อนแอระหว่าง 1-15 เปอร์เซ็นต์ ในสภาพธรรมชาติเมล็ดจะงอกได้น้อย หากแต่มีบางพันธุ์ไม่ปรากฏว่ามีต้นกล้าเล็กของหญ้าแฝกขึ้นมาบริเวณกอหญ้าแฝก เช่น หญ้าแฝกหอมอินเดีย

รากหญ้าแฝกเป็นระบบรากฝอย มี 2 ขนาด คือ เส้นโต และเส้นเล็กฝอยขนาดเล็ก เส้นโตจะเหนียวและแข็งเจาะลงไปในดินได้ลึก เส้นขนาดเล็ก จะแตกแขนงออกมาจากเส้นใหญ่ และสานกันคล้ายร่างแห หรือใยขัดหม้อ รากจะหยั่งลึกลงไปในดินอย่างรวดเร็ว ภายใน 3 อาทิตย์อาจยาวถึง 60 เซนติเมตร ในสภาพพื้นที่บางแห่ง ซึ่งมีหน้าดินลึก รากหญ้าแฝกอาจยาวถึง 3 เมตรเศษ รากหญ้าแฝกจะแตกแขนงเป็นฝอยจำนวนมาก และขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ บางพันธุ์จะรากฝอยละเอียด และสีของรากจะแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ของหญ้าแฝกเช่นเดียวกัน

2) การขยายพันธุ์

การขยายแม่พันธุ์ คือ การนำแม่พันธุ์หญ้าแฝกที่มีลักษณะดีมาทำการขยายเพิ่มปริมาณทั้งการปลูกลงดิน ปลูกลงถุงพลาสติกขนาดใหญ่ หรือการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ ส่วนการขยายพันธุ์กล้าหญ้าแฝก คือ การนำหน่อที่ได้จากการขยายแม่พันธุ์มาเพาะชำเพื่อนำไปปลูกในพื้นที่ ได้แก่ กล้าในถุงพลาสติกขนาดเล็ก และกล้าหญ้าแฝกแบบรากเปลือย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1) การขยายแม่พันธุ์หญ้าแฝก

(1) การขยายพันธุ์ในแปลงขนาดใหญ่ เหมาะสมกับพื้นที่ที่มีการชลประทานและการระบายน้ำดี สามารถปลูกเป็นแปลงขนาดใหญ่โดยไม่ต้องยกร่อง การเตรียมต้นพันธุ์โดยแยกหน่อจากกอนำมาตัดใบให้เหลือความยาว 20 เซนติเมตร และตัดรากให้สั้นแซ่ในระดับน้ำสูง 5 เซนติเมตร เป็นระยะเวลา 5-7 วัน รากจะแตกออกมาใหม่นำไปปลูกโดยใช้ระยะปลูกห่างต้น 5 เซนติเมตร และระหว่างแถว 50 เซนติเมตร หลังจากปลูกต้องให้น้ำอย่างสม่ำเสมอเมื่ออายุได้ 1 เดือน ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 ต้นละ 1 ช้อนชา เมื่อถึงอายุ 4-6 เดือน ให้ขุดนำไปเพาะชำในถุงพลาสติก หรือเตรียมเป็นกล้ารากเปลือยสำหรับใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

(2) การขยายพันธุ์ในถุงพลาสติกขนาดใหญ่ โดยวางเป็นแถวคู่ติดกัน ระยะห่างระหว่างแถวคู่ 1 เมตร ยาวตามพื้นที่ใช้วัสดุปลูกที่มีการระบายน้ำดี เช่น ดินร่วนทราย และขี้เถ้าแกลบ หรือขุยมะพร้าวในสัดส่วน 1:2:1 การติดตั้งระบบน้ำพ่นฝอย หรือมีตาข่ายพรางแสง นำหน่อมาปักชำดูแลจนกระทั่งอายุ 4 เดือน จึงนำไปแยกหน่อเพาะชำต่อไป

2.2) การขยายกล้าหญ้าแฝกสำหรับใช้ปลูก

(1) การเตรียมกล้าหญ้าแฝกในถุง โดยตัดรากให้สั้น และแยกหน่อจากกอ ตัดใบให้ยาว 10 เซนติเมตร นำมาล้างน้ำมัดรวมกันวางลงบนขุยมะพร้าวที่ชื้น หรือแช่ในระดับน้ำสูง 5 เซนติเมตร ในที่ร่มเงา 4 วัน แล้วจึงคัดหน่อที่ออกรากมาปักชำในถุงพลาสติกขนาดเล็ก (2X6 นิ้ว) และใส่วัสดุเพาะชำที่ระบายน้ำดีมีธาตุอาหารสมบูรณ์ ดูแลรดน้ำในสภาพเรือนเพาะชำ เมื่ออายุ 45-60 วันให้นำไปปลูกในพื้นที่ขณะที่ดินมีความชื้น

(2) การเตรียมกล้าหญ้าแฝกแบบรากเปลือย โดยการแยกหน่อจากกอ ตัดใบให้ยาว 20 เซนติเมตร ตัดรากให้สั้น วางบนขุยมะพร้าวที่ชื้น หรือแช่ในน้ำให้ท่วมรากจนกระทั่งรากงอกขึ้นมายาว 1-2 เซนติเมตร นานประมาณ 5-7 วัน จึงนำไปปลูกในช่วงต้นฤดูฝน และภายหลังการปลูกลงดินแล้วควรมีการให้ความชื้นติดต่อกันอย่างน้อย 15 วัน

2.4.4 ไผ่ป่า

ไผ่ป่ามีชื่อวิทยาศาสตร์ *Bambusa bambos* (L.) Voss ชื่อวงศ์ Gramineae ชื่อพื้นเมือง ไผ่ป่า หรือไผ่หนาม (กลาง) ซางหนาม (ชาน ภาคเหนือ) ชารอง (นครพนม) ไผ่ ไผ่ป่า (ทั่วไป) ทะงาน (ชอง ตราด) ไผ่รวก (กาญจนบุรี) วาคะยู (กะเหรี่ยง) และระไซ (เขมร สุรินทร์) (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2554) ดังรูปที่ 2.8

รูปที่ 2.8 ไผ่ป่า

ที่มา : กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2554

1) ลักษณะทั่วไป

ไผ่ป่าเป็นไม้ขนาดใหญ่ กอแน่น มีหนาม และมีแขนงรกแน่น โดยเฉพาะตรงบริเวณโคนลำต้น สูงประมาณ 10-24 เซนติเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 15-18 เซนติเมตร ปล้องยาวประมาณ 20-40 เซนติเมตร เนื้อหนา 1-5 เซนติเมตร ลำอ่อนมีสีเขียว ลำแก่จะมีสีเขียวเหลือง ข้อมีลักษณะบวมเล็กน้อย รูกระบอกเล็ก กาบหุ้มลำลักษณะแข็งเหมือนหนัง ร่วงหลุดได้ง่าย ยาว 30-40 เซนติเมตร กว้าง 20-30 เซนติเมตร ตอนปลายกลม ขอบเรียบ และมีขนสีทอง ลำใหญ่กว้าง กระจับกาบหุ้มลำแคบ ใบยอดกาบเป็นรูปสามเหลี่ยม

มีการกระจายกว้างขวางอยู่ในบริเวณโซนร้อนของเอเชีย พบขึ้นอยู่ในป่าของอินเดีย บังคลาเทศ ศรีลังกา พม่า เวียดนาม ลาว เขมร มาเลเซีย และไทย ซึ่งในประเทศไทยกระจายขึ้นทั่วไปตามริมห้วย ริมแม่น้ำ ในบริเวณที่ชุ่มชื้น และปลูกกันมากตามหัวไร่ปลายนา

2) การขยายพันธุ์และการผลิตกล้า

ไผ่ป่านิยมทำการขยายพันธุ์โดย การปักชำข้อ และเพาะเมล็ด ซึ่งสามารถเก็บเมล็ดได้มาก เช่นเดียวกับไผ่รวก และไผ่ซางนวล ปริมาณเมล็ด 1 กิโลกรัม ประมาณ 81,800 เมล็ด

3) การปลูกดูแลบำรุงรักษา

การคัดเลือกพื้นที่ และเตรียมพื้นที่ปลูก ควรเตรียมพื้นที่ไว้ตั้งแต่ฤดูแล้ง ซึ่งจะทำงานได้สะดวกสามารถลงมือปลูกได้ทันในต้นฤดูฝน โดยในพื้นที่ที่เป็นแอ่ง ที่ลุ่มน้ำขัง มีเนิน หรือมีตออยู่ในพื้นที่ต้องไถบุกเบิก กำจัดตอออกให้หมด และปรับสภาพพื้นที่ให้เรียบ หากแต่ถ้าเป็นพื้นที่ราบอยู่แล้วให้ไถพรวนกำจัดวัชพืชอย่างเดียว และในแหล่งที่สามารถให้น้ำได้ตลอดทั้งปีก็สามารถปลูกไผ่ได้ตลอดปีเช่นกัน โดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือควรปลูกตั้งแต่ฝนเริ่มตกจนถึงปลายเดือนมิถุนายน หากฝนทิ้งช่วงควรให้น้ำช่วย หลุมที่ปลูกไผ่ตงควรมีขนาด กว้างxยาวxลึก ไม่น้อยกว่า 50x50x50 เซนติเมตร ให้ใช้ปุ๋ยหินฟอสเฟต 1 กระป๋องนม (ประมาณ 300-500 กรัม) ต่อหลุม ผสมปุ๋ยคอกเก่าที่สลายตัวแล้ว 1 บุ้งกี๋ (ประมาณ 1 กิโลกรัม) และยาฆ่าแมลงฟูราดาน 1-1.5 ช้อนแกง (10-15 กรัม) คลุกเคล้ากับดินบนให้ทั่วแล้วกลบกลับคืนลงไปในหลุมให้ระดับดินสูงกว่าเดิมเล็กน้อยเผื่อดินยุบตัวภายหลัง

สำหรับระยะเวลาที่เหมาะต่อการปลูกไผ่อยู่ในช่วงฤดูฝน คือ ระหว่างเดือนพฤษภาคม - กันยายน เนื่องจากช่วงระยะที่เริ่มปลูกไผ่ต้องการน้ำมาก การปลูกในช่วงฤดูฝนจึงลดค่าใช้จ่ายในการรดน้ำลงได้มาก และเป็นระยะที่ไผ่มีการเจริญเติบโตดีที่สุดด้วย สำหรับระยะปลูกและจำนวนกล้าไผ่ต่อพื้นที่ ควรมีระยะปลูกประมาณ 8x8 เมตร หรือประมาณ 25 กอต่อไร่ หลุมที่ปลูกมีขนาดประมาณ 50x50x50 เซนติเมตร

4) โรคและแมลง

แมลงประเภทเจาะไชหน่อ และปล้องอ่อน ได้แก่ แมลงจำพวกด้วง ด้วงงวงปีกแข็ง และแมลงประเภทกัดกินใบ และประเภทม้วนใบ เพื่อเป็นที่หลบซ่อนตัว และเป็นที่อาศัยในระยะเป็นดักแด้ ได้แก่ หนอนผีเสื้อกลางคืน แมลงประเภทเจาะไชใบ ได้แก่ หนอนผีเสื้อขนาดเล็ก และแมลงประเภทเพลี้ยแป้ง ซึ่งชอบเกาะอยู่ตามหน่ออ่อนหรือตามใบอ่อนเพื่อดูดกินน้ำเลี้ยงที่ยอด

5) อัตราการเจริญเติบโต

เมื่อเริ่มปลูกไผ่ในระยะแรก ต้นไผ่จะยังไม่โต แต่จะแตกกิ่งก้าน และใบ เพื่อการสะสมอาหาร เมื่อสะสมอาหารเต็มที่แล้ว ประกอบกับสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมจะทำให้หน่ออ่อน มีการแตกตาจากเหง้าใต้ดิน แต่ยังมีขนาดเล็กกว่าขนาดปกติของไผ่ชนิดนั้น ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 3-4 ปี เมื่อไผ่เจริญเติบโตเป็นกอเต็มที่แล้วก็จะแตกหน่อใหม่ทุกปี ขนาดของหน่ออ่อนจะโตเท่ากับลำแม่ในกอ ไผ่ที่มีลำ และกอขนาดใหญ่จะสามารถสะสมอาหารได้มากกว่า นอกจากนี้หน่อไผ่จะมีการเจริญเติบโตตลอดทั้งวัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5 ปุ๋ยอินทรีย์

2.5.1 ลักษณะของปุ๋ยอินทรีย์

ปุ๋ยอินทรีย์ (Organic Fertilizer) หมายถึง ปุ๋ยที่มีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ธาตุอาหารในปุ๋ยจะเกิดประโยชน์ต่อพืชก็ต่อเมื่อได้ผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ก่อนแล้วจึงปลดปล่อยออกมาในรูปอนินทรีย์ ปุ๋ยอินทรีย์ที่ใช้กันแพร่หลายได้แก่ ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก และปุ๋ยพืชสด เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมไปถึงซากพืช ซากสัตว์ ของเหลือทิ้งและผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งหากนำมาใช้เป็นปุ๋ยก็จัดได้ว่าเป็นปุ๋ยอินทรีย์เพราะมีสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบในสัดส่วนสูง นอกจากนี้ ยงยุทธ โอสถสภา (2542) ได้ให้ความหมายของปุ๋ยอินทรีย์ว่า เป็นปุ๋ยที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (ยกเว้น คาร์บอเนต) ร่วมกับธาตุอาหารพืช (นอกเหนือจากไฮโดรเจน และออกซิเจน) อย่างน้อยหนึ่งธาตุ ซึ่งส่วนใหญ่ได้มาจากซากพืชและสัตว์ รวมทั้งมูลสัตว์ต่างๆ (ธงชัย มาลา, 2550 และอำนาจ สุวรรณฤทธิ์, 2548)

2.5.2 ประเภทของปุ๋ยอินทรีย์

1) ปุ๋ยคอก

ปุ๋ยคอกเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้มาจากสิ่งขับถ่ายของสัตว์เลี้ยง เช่น โค กระบือ สุกร เป็ด ไก่ และห่าน เป็นต้น โดยอาจจะใช้ในรูปของปุ๋ยคอกแบบสด แบบแห้ง หรือนำไปหมักให้เกิดการย่อยสลายก่อนแล้วค่อยนำไปใช้ก็ได้ ซึ่งต้องคำนึงถึงชนิดของดินและพืชที่ปลูกด้วย โดยเฉพาะการใช้ปุ๋ยคอกแบบสดอาจทำให้เกิดความร้อน และมีการดึงธาตุอาหารบางตัวไปใช้ในการย่อยสลายมูลสัตว์ ซึ่งอาจจะทำให้พืชเหี่ยวตายได้ การใช้ปุ๋ยคอกนั้น นอกจากจะมีประโยชน์ในการช่วยเพิ่มธาตุอาหารพืชในดินแล้ว ยังช่วยทำให้ดินโปร่ง และร่วนซุย ทำให้การเตรียมดินง่าย การตั้งตัวของต้นกล้าเร็ว และพืชทำให้มีโอกาสรอดได้มากด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) ปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักเป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่ง ซึ่งได้จากการนำชิ้นส่วนของพืช วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น หญ้าแห้ง ใบไม้ ฟางข้าว ซังข้าวโพด กากอ้อยจากโรงงานน้ำตาล และแกลบจากโรงสีข้าว และขี้เลื่อยจากโรงงานแปรรูปไม้ เป็นต้น มาหมักในรูปของการกองซ้อนกันบนพื้นดิน หรืออยู่ในหลุม เพื่อให้ผ่านกระบวนการย่อยสลายให้เน่าเปื่อยเสียก่อน โดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์จนกระทั่ง ได้สารอินทรียวัตถุที่มีความคงทน ไม่มีกลิ่น มีสีน้ำตาลปนดำ ซึ่งการทำปุ๋ยหมักใช้สามารถทำได้โดยการนำวัสดุต่างๆ มากองสุมให้สูงขึ้นจากพื้นดิน 30-40 เซนติเมตร แล้วโรยปุ๋ยคอกผสมปุ๋ยเคมีสูตรเสมอ 15-15-15 ประมาณ 1-1.5 กิโลกรัม ต่อเศษพืชหนัก 1,000 กิโลกรัม เสร็จแล้วก็กองเศษพืชซ้อนทับลงไปอีกแล้วโรยปุ๋ยคอกผสมปุ๋ยเคมี ทำเช่นนี้

เรื่อยไปเป็นชั้นๆ จนสูงประมาณ 1.5 เมตร ควรมีการรดน้ำแต่ละชั้นเพื่อให้มีความชุ่มชื้น และเป็นการทำให้มีการเน่าเปื่อยได้เร็วขึ้น กองปุ๋ยหมักนี้ทิ้งไว้ 3-4 สัปดาห์ ก็ทำการกลับกองปุ๋ยครั้งหนึ่ง

3) ปุ๋ยพืชสด

ปุ๋ยพืชสดเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากการปลูกพืชบำรุงดิน ได้แก่ พืชตระกูลถั่วต่าง ๆ แล้วทำการไถกลบเมื่อพืชเจริญเติบโตมากที่สุด ซึ่งเป็นช่วงที่กำลังออกดอก พืชตระกูลถั่วที่ควรใช้เป็นปุ๋ยพืชสดควรมีอายุสั้น มีระบบรากลึก ทนแล้ง ทนโรคและแมลงได้ดี เป็นพืชที่ปลูกง่าย และมีเมล็ดมาก ตัวอย่างพืชเหล่านี้ ได้แก่ ถั่วพุ่ม ถั่วเขียว ถั่วลาย ปอเทือง ถั่วขอ ถั่วแปบ และโสน เป็นต้น

2.6 ปุ๋ยเคมี

2.6.1 ลักษณะของปุ๋ยเคมี

ปุ๋ยเคมี (Chemical Fertilizer) ตามพระราชบัญญัติปุ๋ย (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550 (สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร, 2551) หมายถึง ปุ๋ยที่ได้จากสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์สังเคราะห์ที่อาจเป็นปุ๋ยเชิงเดี่ยว เช่น ปุ๋ยยูเรียหรือแอมโมเนียมซัลเฟต หรืออาจเป็นปุ๋ยเชิงผสม ปุ๋ยเชิงประกอบ ปุ๋ยสูตรต่างๆ รวมทั้งปุ๋ยอินทรีย์เคมี ได้แก่ ปุ๋ยที่มีปริมาณธาตุอาหารที่แน่นอนแต่ไม่รวมถึงสารกลุ่มดังนี้

1) ปูนขาว ดินมาร์ล ปูนปลาสเตอร์ ยิปซัม โดโลไมต์ หรือสารอื่นที่รัฐมนตรี กำหนดโดยประกาศในราชกิจนุเบกษา เรื่อง กำหนดปุ๋ยเคมีมาตรฐาน ตามพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2518 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติปุ๋ย (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550 (สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร, 2551)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) สารอินทรีย์หรืออินทรีย์ ทั้งที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ หรือทำขึ้นก็ตาม โดยมุ่งหมายสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมหรือกิจการอื่นตามที่รัฐมนตรีประกาศในราชกิจจานุเบกษาปุ๋ยเคมีเป็นปุ๋ยที่ได้จากสารอนินทรีย์หรืออินทรีย์สังเคราะห์ที่มีธาตุอาหารหลัก N-P-K โดยมักผลิตได้จากสารตั้งต้นมาจากก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ได้มาจากการสังเคราะห์น้ำมัน และนำมารวมกับกรดโดยผ่านขบวนการทางเคมี จะได้ธาตุ N-P-K ออกมาเป็นแม่ปุ๋ยสูตรต่างๆ แล้วแต่ว่าจะใช้กรดชนิดใดในการทำปฏิกิริยา (ดังนั้นหากใช้ปุ๋ยเคมีไม่ถูกวิธีจะทำให้ดินเป็นกรด) ธาตุอาหารในปุ๋ยเคมี แบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ

2.1) ธาตุอาหารหลัก ประกอบด้วย ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม

2.2) ธาตุอาหารรอง ประกอบด้วย แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน

2.3) ธาตุอาหารเสริม ประกอบด้วย เหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง โบรอน โมลิดินัม และคลอรีน

2.6.2 ชนิดปุ๋ยเคมี

1) ปุ๋ยเชิงเดี่ยว (Straight Fertilizer) เป็นปุ๋ยเคมีที่มีธาตุอาหารหลักเพียงธาตุเดียว อาจเป็นธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส หรือ โพแทสเซียม เช่น ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต ที่มีธาตุไนโตรเจนเพียงธาตุเดียว หรือปุ๋ยสูตร 46-0-0 เป็นต้น

2) ปุ๋ยเชิงผสม (Mixed Fertilizer) เป็นปุ๋ยเคมีที่มีการผสมของปุ๋ยเคมีเชิงเดี่ยวมากกว่าหนึ่งชนิดเข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้ธาตุอาหารตามที่ต้องการ เช่น ปุ๋ยสูตร 15-15-15 ที่เป็นการผสมแม่ปุ๋ยทั้งไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม

3) ปุ๋ยเชิงประกอบ (Compound Fertilizer) เป็นปุ๋ยเคมีที่ผลิตขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมีที่ประกอบด้วยธาตุปุ๋ยอย่างน้อยสองธาตุขึ้นไป ซึ่งธาตุปุ๋ยชนิดต่างๆ จะอยู่รวมกันในสารประกอบเดียวกัน เช่น สารประกอบหรือแม่ปุ๋ยโพแทสเซียมไนเตรต (KNO_3) ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต [$(NH_4)^2$ HPO_4] และโพแทสเซียมเมตาฟอสเฟต (KPO_3)

2.6.3 สูตรปุ๋ยหรือเกรดปุ๋ย (fertilizer grade)

การใช้สัญลักษณ์ตัวเลขสำหรับบ่งบอกเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P_2O_5) และปริมาณโพแทสเซียมที่ละลายน้ำได้ (K_2O) ซึ่งตัวเลขดังกล่าวจะเขียนไว้ที่กระสอบปุ๋ย เช่น สูตร 15-15-15 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า

1) ตัวเลขแรก บอกปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 15 กิโลกรัม ในปุ๋ยหนัก 100 กิโลกรัม

2) ตัวเลขตัวที่สอง บอกปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 15 กิโลกรัม ในปุ๋ยหนัก 100 กิโลกรัม

3) ตัวเลขตัวที่สาม บอกปริมาณโพแทสเซียมที่ละลายน้ำได้ 15 กิโลกรัม ในปุ๋ยหนัก 100 กิโลกรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อัตราปุ๋ย หมายถึง ปริมาณปุ๋ยแต่ละสูตรที่ใส่ให้แก่พืชต่อหน่วยพื้นที่หนึ่งไร่หรือต่อหนึ่งตัน ตัวอย่างการใส่ปุ๋ยที่มีอัตราเท่ากัน เช่น ปุ๋ยสูตร 10-10-10 และ 15-15-15 มีเรโชเท่ากันที่เท่ากับ 1 : 1 : 1 ดังนั้น การใส่ปุ๋ยทั้งสองสูตรสามารถใช้ทดแทนกันได้ เพียงแค่ปรับปริมาณการใช้ตามขนาดพื้นที่ตามอัตราที่กำหนดเท่านั้น เช่น หากแต่ก่อนใส่ปุ๋ยสูตร 10-10-10 อัตรา 50 กิโลกรัม/ไร่ แต่ต้องการเปลี่ยนใช้สูตร 15-15-15 ก็ปรับอัตราใช้เป็นเพียง 33.3 กิโลกรัม/ไร่ เท่านั้น ซึ่งปริมาณธาตุอาหารที่ใส่จะมีปริมาณเท่ากัน

2.6.4 หลักการใช้ปุ๋ยเคมี

การใช้ปุ๋ยเคมีที่ประสิทธิภาพขึ้นกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการ ผู้ใช้ต้องพิจารณาหลักเกณฑ์อย่างน้อย 4 ด้าน คือ

1) การเลือกใช้ชนิดปุ๋ยให้ถูกต้อง

2) การใช้ในปริมาณที่เหมาะสม

3) การใส่ให้กับพืชในระยะที่เหมาะสม

4) การใส่โดยใช้วิธีการที่ถูกต้อง

2.6.5 ข้อดีและข้อเสียปุ๋ยเคมี

ข้อดีของปุ๋ยเคมี

1) มีปริมาณธาตุอาหารต่อหน่วยน้ำหนักสูง ใช้ในปริมาณน้อยก็เพียงพอกับความต้องการของพืช

2) ละลายน้ำได้ดี และปลดปล่อยธาตุอาหารได้เร็ว พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที

3) หาซื้อง่ายตามท้องตลาด ตามร้านขายของด้านการเกษตร

4) ถูกบรรจุในถุง สามารถขนส่งและเคลื่อนย้ายได้ง่าย

ข้อเสียของปุ๋ยเคมี

1) มีส่วนผสมของดินขาว เมื่อใช้มากหรือใช้ในระยะเวลาต่อเนื่องหลายปีจะทำให้เนื้อดินแน่น ดินเกาะกันเป็นก้อนระบายน้ำไม่ดี

2) หากใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวจะทำให้ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินน้อยลง ปริมาณจุลินทรีย์ และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในดิน เช่น ไส้เดือน มีปริมาณน้อยลง

3) ดินมีความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้นจากปริมาณธาตุอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น รวมถึงค่าความเค็มในดินเพิ่มขึ้น

4) หากใส่มากเกินไปอาจเป็นพิษต่อพืช

5) หากใส่ไม่ถูกต้องอาจทำให้ธาตุอาหารสูญเสียโดยเปล่าประโยชน์ ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายสูงขึ้น

6) ต้องมีความรู้ความเข้าใจในเรื่องปุ๋ยเคมี หากเลือกซื้อโดยขาดความเข้าใจ เช่น ปุ๋ยสูตรใดเหมาะกับพืชที่ปลูกหรือปุ๋ยสูตรใดเหมาะกับระยะเติบโตของพืช อาจทำให้ซื้อปุ๋ยมาโดยไม่คุ้มค่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.7 การบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยพืช (Phytoremediation)

Phytoremediation เป็นเทคโนโลยีของการใช้พืชในการบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษ เพื่อเป็นการลดอันตรายของสารมลพิษที่อาจส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีนี้สามารถใช้ในการบำบัดสารมลพิษทั้งที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่อยู่ในตัวกลาง ดิน น้ำ หรืออากาศ เช่น ไตรไนโตรโทลูอีน (2,4,6-Trinitrotoluene) ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เบนซีน (Benzene) โทลูอีน (Toluene) เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene) ไซลีน (Xylene) โลหะหนัก

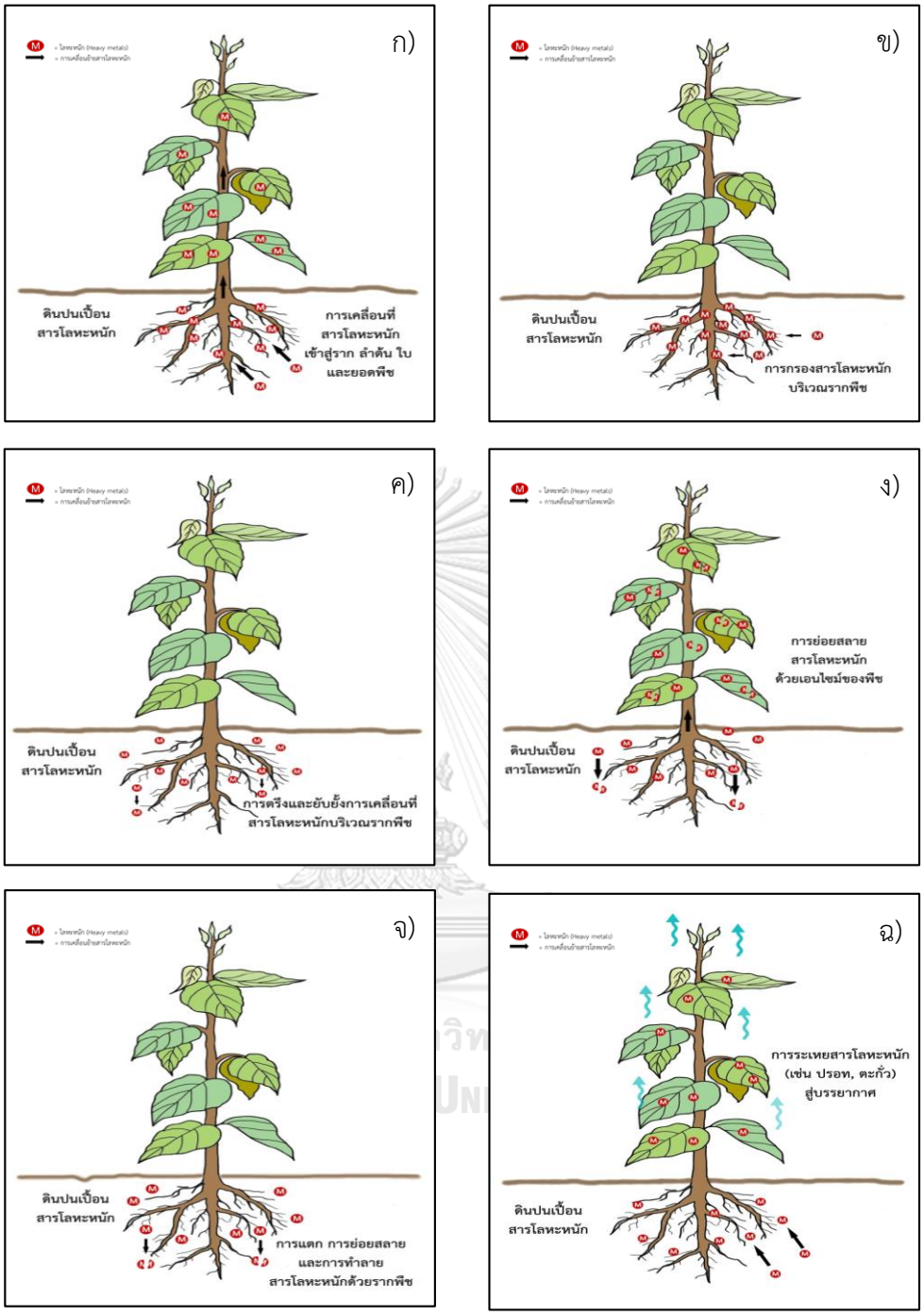
(Heavy metals) และนิวไคลด์กัมมันตรังสี (Radionuclides) เป็นต้น ดังรูปที่ 2.9 การบำบัดสารมลพิษโดยใช้เทคโนโลยี Phytoremediation สิ่งสำคัญ คือ การเลือกใช้พืชในการบำบัดสารมลพิษในบริเวณที่มีการปนเปื้อน นอกจากนี้ยังต้องมีความเข้าใจพฤติกรรมของสารมลพิษที่จะทำการบำบัดในตัวกลางนั้นๆ และปัจจัยอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติเพื่อช่วยให้การบำบัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น ได้แก่ กระบวนการทางฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยา ดังนั้น Phytoremediation จึงเป็นแนวทางเลือกหนึ่งสำหรับใช้บำบัดสารมลพิษโดยการพึ่งพาสิ่งที่มีอยู่แล้วในระบบธรรมชาติ และเป็นวิธีที่ประหยัดต้นทุนในการบำบัดสารมลพิษ โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีที่มีราคาแพง และเป็นสาเหตุของการทำลายธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น วิธีชะล้างดิน (Soil Washing) และการตักหรือขุดลอกหน้าดินไปกำจัดนอกพื้นที่ ซึ่งจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรและต้นทุนในการบำบัดสูง

2.7.1 ประเภทของการบำบัดโดยใช้พืช

การบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนด้วยพืชมีหลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งตามกลไกของพืชที่ใช้ในการกำจัดสารพิษต่างๆ ที่ ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) หรือการการสะสมสารมลพิษในพืช (Phytoaccumulation)

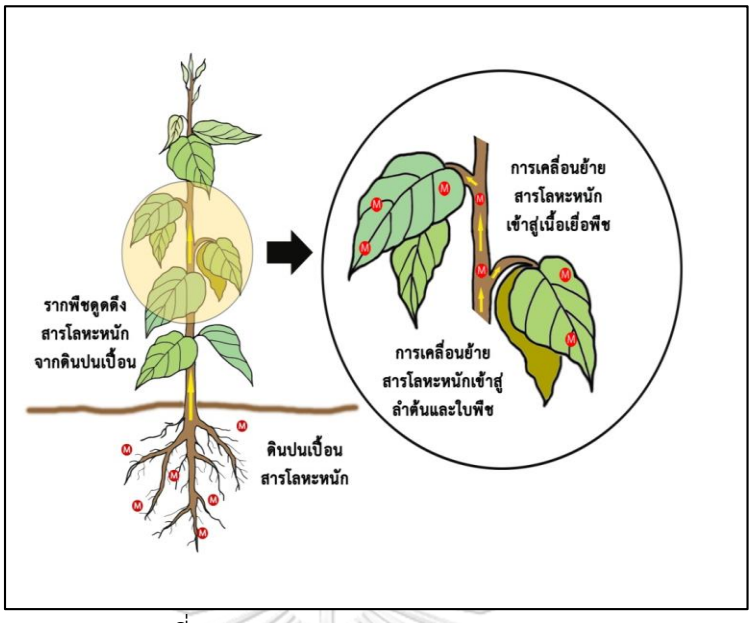
การสกัดสารมลพิษด้วยพืช หรือ Phytoextraction เป็นการใช้พืชเพื่อบำบัดสารมลพิษที่อยู่ในดิน ตะกอนดิน โดยใช้พืชไปดูดซึมสารมลพิษโดยผ่านราก แล้วไปเก็บสะสมในเนื้อเยื่อพืชส่วนที่เป็นลำต้น และ ใบ (รูปที่ 2.10) มีปัจจัยหลายประการที่จำกัดการบำบัดสารโลหะหนัก (Metal Phytoextraction) เช่น อัตราการดูดซึมสารโลหะหนักโดยราก การนำไปใช้ประโยชน์ของโลหะหนักโดยพืช (Metal Bioavailability) สัดส่วนของสารโลหะหนักที่ถูกดูดซึมโดยราก ความทนได้ของเซลล์พืชต่อสารโลหะหนักที่เป็นพิษ ดังนั้นพืชที่ใช้ในการบำบัดจึงควรมีความสามารถในการสะสมสารโลหะหนักโดยผ่านรากได้มาก และสามารถเคลื่อนย้ายสารโลหะหนักไปสู่ส่วนของต้นพืชได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้พืชควรมีกลไกในการลดความเป็นพิษของสารโลหะหนัก (Detoxify) และมีความทนต่อปริมาณสารโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูง สารโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ เช่น เงิน แคดเมียม โคบอลต์ โครเมียม ทองแดง ปรอท แมงกานีส โมลิบดีนัม นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี โดยเฉพาะสารกัมมันตรังสีที่สามารถบำบัดโดยวิธีนี้ เช่น สตรอนเชียม-90 (90Sr) ซีเซียม-137 (137Cs) พลูโทเนียม-239 (239Pu) ยูเรเนียม-238 (238U) Phytoextraction ทั้งนี้สามารถแบ่งกระบวนการบำบัดนี้ได้ 2 ชนิด คือ Natural Phytoextraction และ Induced Phytoextraction ดังรูปที่ 2.11 (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558)



รูปที่ 2.9 กระบวนการ Phytoremediation

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

ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558



รูปที่ 2.10 กระบวนการ Phytoextraction

ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558

1.1) Natural Phytoextraction เป็นการบำบัดสารมลพิษโดยวิธีการปลูกพืชในดินที่ปนเปื้อนด้วยสารมลพิษ แล้วทำการรดน้ำใส่ปุ๋ยเท่าที่จำเป็น เพราะพืชบางชนิดสามารถเจริญเติบโตโดยไม่จำเป็นต้องใส่ปุ๋ยหรือรดน้ำ แต่อาศัยน้ำฝนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ส่วนใบและลำต้นพืชที่มีการสะสมสารมลพิษ จะถูกเก็บเกี่ยว และทำการบำบัดโดยวิธีที่เหมาะสมต่อไป พืชที่เลือกใช้ส่วนใหญ่จะเป็นพืชที่ชอบขึ้นตามธรรมชาติอยู่แล้ว และมีความทนทานต่อความเข้มข้นของโลหะหรือสารมลพิษอื่น ๆ โดยทั่วไปแล้ว พืชเหล่านี้จะเป็นพืชที่เจริญเติบโตไม่รวดเร็วนัก และเมื่อเจริญเติบโตเต็มที่แล้วจะมีขนาดที่ไม่ใหญ่และมีรากตื้น

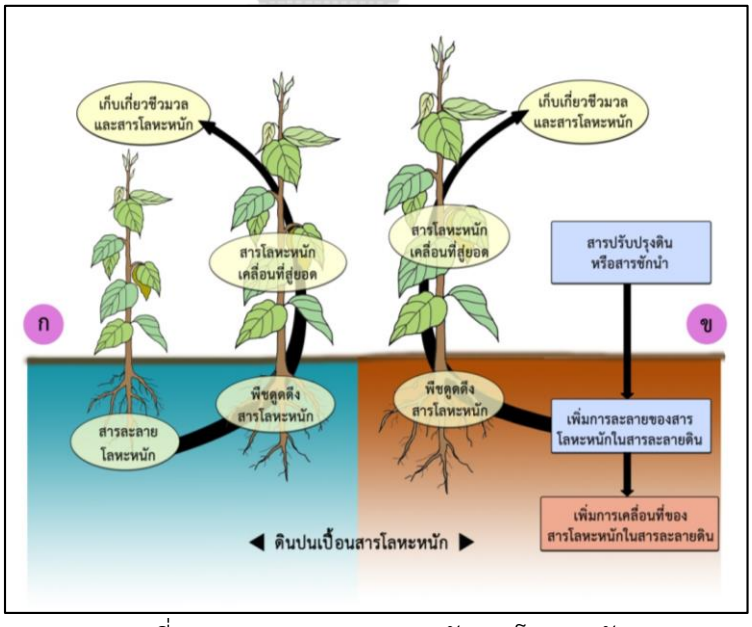
1.2) Induced Phytoextraction เป็นการบำบัดสารมลพิษโดยการเลือกใช้พืชที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วตลอดอายุการเจริญเติบโต ร่วมกับการเติมสารปรับปรุงดินหรือสารชักนำ (Inducing Agent) เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษสู่พืชมากขึ้น ยังผลให้เพิ่มขีดความสามารถในการบำบัดสารมลพิษ

พืชกลุ่มไฮเพอร์แอกคิวมิวเลเตอร์ หรือ Phytoaccumulation คือ พืชที่มีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักขึ้นไปสะสมไว้ในราก ลำต้น และใบ ซึ่งปัจจุบันมีมากกว่า 400 ชนิด ทั้งนี้ได้มีการนำพืชกลุ่มไฮเพอร์แอกคิวมิวเลเตอร์มาใช้ในการบำบัด และฟื้นฟูโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และดินตะกอน อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการบำบัดการปนเปื้อนโลหะหนักในดินด้วยพืช ซึ่งพืชทุกชนิดมีการดูดดึงแร่ธาตุหรือโลหะหนักในอัตราและปริมาณที่แตกต่างกัน พืชที่มีความเหมาะสมในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนควรเป็นพืชที่โตเร็ว มีมวลชีวภาพสูง มีระบบราก

ที่กว้าง มีวงจรชีวิตสั้น สามารถขยายพันธุ์ได้ดี สามารถเก็บเกี่ยวได้ง่าย มีความทนทาน เจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีการปนเปื้อน และสามารถสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณที่สูง อีกทั้งพืชกลุ่มไฮเพอร์แอกคิวมิวเลเตอร์จะมีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณมากแม้ว่าในดินจะมีปริมาณโลหะหนักในปริมาณที่ต่ำ อย่างไรก็ตาม พืชจะต้องมีการสะสมโลหะหนักในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) มากกว่าในส่วนเหนือดิน (รากและส่วนอื่นๆ) หลายเท่าตัว

2) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (Phytostabilization)

การตรึงสารมลพิษด้วยพืช หรือเรียกว่า Phytostabilization เป็นการใช้พืชเพื่อยับยั้งหรือลดการเคลื่อนที่ของสารมลพิษในดิน ตะกอนดิน หรือตม โดยการใช้รากพืชเพื่อจำกัดการเคลื่อนที่ และการดูดจับของสารมลพิษในดิน ตะกอนดิน หรือตม ดังรูปที่ 2.12 พืชที่ใช้ควรมีความสามารถในการลดปริมาณการซึมผ่านของน้ำในโครงสร้างของดิน เพื่อเป็นการลดปริมาณสารมลพิษปนเปื้อนไปสู่น้ำใต้ดิน ป้องกันการสึกกร่อนของหน้าดิน และการกระจายของสารมลพิษไปยังบริเวณอื่น ๆ การบำบัดโดยวิธีนี้สามารถเกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการดูดซับ (Sorption) การตกตะกอน (Precipitation) การเกิดสารเชิงซ้อน (Complexation) การรีดิวซ์เวเลนซีโลหะ (Metal Valence Reduction) สารโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ เช่น ตะกั่ว สารหนู แคดเมียม โครเมียม ทองแดง และ สังกะสี



รูปที่ 2.11 ประเภทของการสกัดสารโลหะหนัก

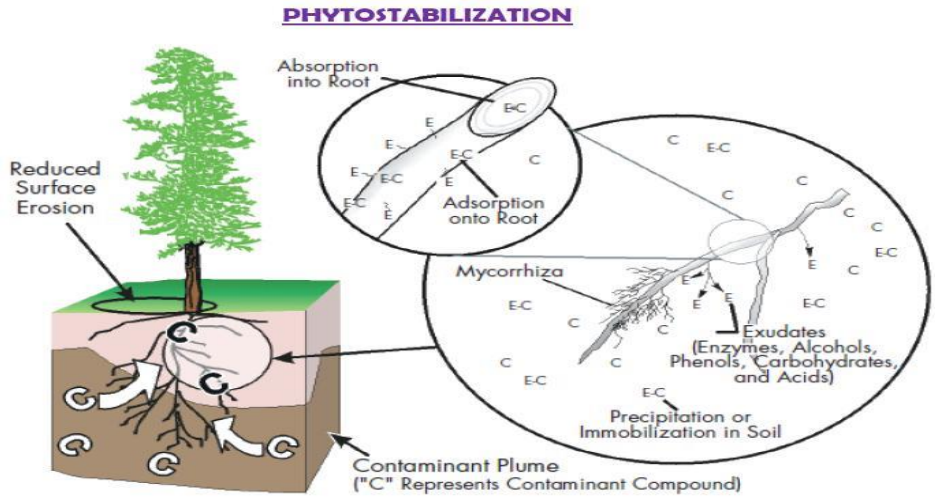
ก) การบำบัดสารโลหะหนักด้วยการปลูกพืชในดินแบบธรรมชาติ และ

ข) การบำบัดสารโลหะหนักด้วยการเติมสารปรับปรุงดินหรือสารชักนำ

ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558

3) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช (Phytovolatilization)

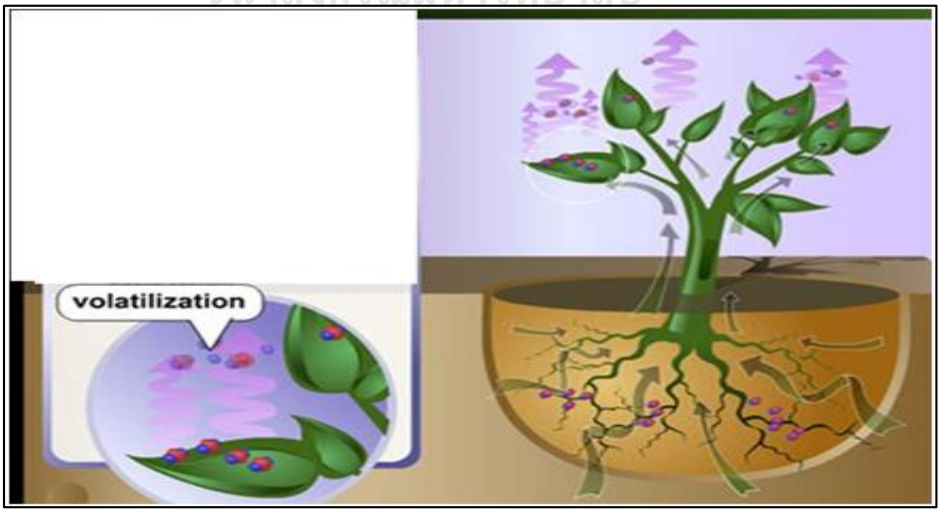
การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช หรือ Phytovolatilization เป็นการใช้พืชเพื่อไปดูดจับสารมลพิษด้วยกลไกที่เกิดขึ้นในต้นพืชเอง ซึ่งพืชมีการแปลง (Tranformation) สารมลพิษให้อยู่ในรูปที่ระเหยได้และมีความเป็นพิษลดลงจากเดิม หลังจากนั้นสารมลพิษที่อยู่ในรูปที่ระเหยได้สามารถกำจัดออกโดยผ่านทางใบพืช ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์ได้ให้ความสนใจ และศึกษาค้นคว้าวิจัย เพื่อการปรับปรุงพันธุ์พืชที่สามารถทำหน้าที่พิเศษนี้ได้อย่างยอดเยี่ยม โดยสารโลหะหนักที่สามารถบำบัดด้วยวิธีนี้ เช่น ปรอท



รูปที่ 2.12 กระบวนการ Phytostabilization

ที่มา: Cunningham และ Ow, 1996

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.13 กระบวนการ Phytovolatilization

ที่มา: Environmental Biotechnology, 2011a

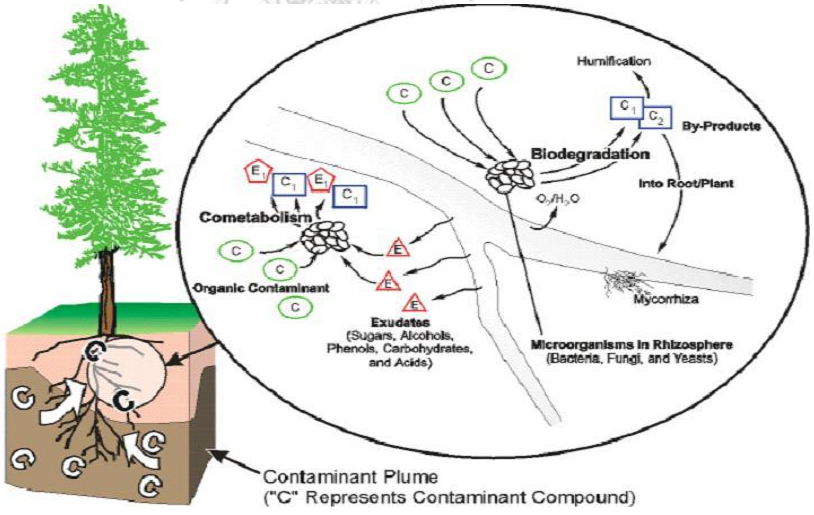
4) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช Rhizodegradation

การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช หรือ Rhizodegradation เป็นการย่อยสลายสารมลพิษบริเวณรากพืชโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ถูกกระตุ้นจากพืชได้ 2 ลักษณะ คือ การที่รากพืชช่วยปรับปรุงโครงสร้างทางกายภาพของดิน เช่น การชอนไชและการหยั่งลึกของรากพืชช่วยเพิ่มออกซิเจนให้แก่ดิน ทำให้สารอาหาร และน้ำแพร่ลงไปสู่ดินชั้นล่างได้มากขึ้น ถือเป็นการปรับสภาวะให้เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารพิษได้ (Cheema และคณะ, 2010; Lee และคณะ, 2008; Merkl และคณะ, 2005; และ Xu, และคณะ, 2006) สารที่หลั่งจากรากพืชยังช่วยกระตุ้นการย่อยสลายสารมลพิษได้ โดยสารที่หลั่งจากรากพืชเป็นได้ทั้งสารลดแรงตึงผิว เอนไซม์ สารอาหาร หรือสารอาหารร่วม เพื่อกระตุ้นให้จุลินทรีย์ใช้สารอาหารในการย่อยสลายสารพิษได้ด้วย (Cheema และคณะ, 2009) ดังรูปที่ 2.14 ตัวอย่างสารเคมีที่หลั่งจากรากพืช เช่น กรดอะมิโน น้ำตาล และฟีนอล เป็นต้น ทั้งนี้ สามารถใช้ปริมาณฟีนอลที่พืชหลั่งออกมาเป็นตัวคัดเลือกพืชที่นำมาใช้ในการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมได้ เนื่องจากฟีนอลเป็นสารที่มีโครงสร้างคล้ายกับสารตัวกลางในวิถีของการย่อยสลายพีเอเอช (PAH) ดังนั้นพืชที่หลั่งฟีนอลสามารถกระตุ้นให้แบคทีเรียที่อาศัยอยู่โดยรอบสามารถผลิตเอนไซม์ที่ไม่มีความจำเพาะเจาะจงกับฟีนอลเพียงอย่างเดียวมาย่อยสลายสารกลุ่มพีเอเอชที่มีโครงสร้างคล้ายคลึงกันได้ (Cheema และคณะ, 2010; Lee และคณะ, 2008) โดยบริเวณรอบรากพืชเป็นบริเวณที่มีการย่อยสลายปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนสูงมาก (Newman, 2004) บริเวณรอบรากพืชดังกล่าว มีปริมาณจุลินทรีย์มากกว่าดินที่ไม่ปลูกพืชประมาณ 10-100 เท่า (Gerhardt และคณะ, 2009) Sheng-Yu และคณะ (2005) พบว่า การปลูกพืช *Trifolium repens* ซึ่งเป็นพืชตระกูลถั่วร่วมกับการทำงาน ของจุลินทรีย์บริเวณรอบรากพืชจะสามารถช่วยกำจัดไพรีนที่ปนเปื้อนในดินได้ถึง 77% การลดลงของไพรีนที่เกิดจากกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์บริเวณรอบรากพืช การทำงานร่วมกันระหว่างพืชและจุลินทรีย์ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไพรีนสูงกว่าดินที่ไม่เติมจุลินทรีย์ และดินที่เติมเฉพาะจุลินทรีย์แต่ไม่ปลูกพืชถึง 57% และ 31% ตามลำดับ และจากการศึกษาของ Batty และ Anslow (2008) พบว่า เมื่อปลูกผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) ซึ่งเป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมสังกะสีได้ดี กับหญ้าทอลเฟสคิว (*Festuca arundinacea*) ซึ่งเป็นพืชที่ไม่สะสมสังกะสีแต่ทนทานต่อสังกะสี และ PAHs โดยปลูกลงในดินที่ปนเปื้อนสังกะสี 8,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ร่วมกับไพรีน 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า การปนเปื้อนทั้งไพรีน และสังกะสีทำให้ชีวมวลของพืชลดลง แต่ทำให้มีการสะสมสังกะสีในเนื้อเยื่อของพืชมากขึ้น ส่วนผลต่อการย่อยสลายไพรีนนั้นไม่มีการศึกษา

5) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (Phytodegradation)

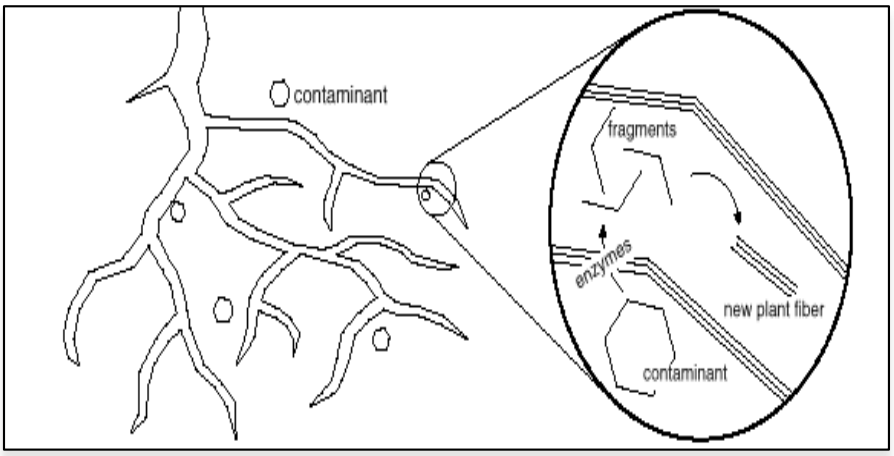
การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช หรือ Phytodegradation เป็นกระบวนการผลิตเอนไซม์ของพืชที่ใช้ในการย่อยสลายมีทั้งที่เป็นเอนไซม์ที่สร้างภายในเซลล์ และเอนไซม์ที่สร้าง แล้วหลั่งออกมานอกเซลล์ หากการย่อยสลายเกิดภายในเซลล์พืชต้องขนส่งสารเข้าสู่เซลล์พืชก่อนจึงจะถูกย่อย

สลายได้ สารที่ขนส่งเข้าสู่เซลล์พืชได้ต้องมีค่า log Kow อยู่ระหว่าง 1 และ 3.5 (Morikawa และ Erkin, 2003) เอนไซม์ที่มีบทบาทในกระบวนการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมด้วยพืชมีหลายชนิด ได้แก่ ดีฮาโลจีเนส (Dehalogenase) ช่วยย่อยสลายสารที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เพอร์ออกซิเดส (Peroxidase) ช่วยเปลี่ยนแปลงสารประเภทฟีนอล ไนโตรรีดักเตส (Nitroreductase) และช่วยเปลี่ยนแปลงสารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบไนไตรเลส (Nitrilase) ช่วยเปลี่ยนแปลงสารประเภทไซยาเนตอะโรมาติก และฟอสฟาเตส (Phosphatase) รวมทั้งช่วยเปลี่ยนแปลงสารประเภทออร์กาโนฟอสเฟต เป็นต้น (Susarla และคณะ, 2002) โดยทั่วไป เอนไซม์ที่มีบทบาทในการย่อยสลายสารมลพิษที่สำคัญมี 2 ชนิด คือ เพอร์ออกซิเดส และดีฮาโลจีเนส (Sheng-wang และคณะ, 2008) โดยเฉพาะเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยสลายสารกลุ่มอะโรมาติก ซึ่งเป็นองค์ประกอบของปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนมักเป็นเอนไซม์ในกลุ่มเดียวกับเอนไซม์ที่ใช้ย่อยสลายสารประเภทฟีนอล การย่อยสลายสารโดยเอนไซม์จากพืชมีบทบาทในการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมน้อยมาก เนื่องจากการย่อยสลายสารมลพิษโดยเอนไซม์จากพืชเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์เหมือนกับการย่อยสลายสารที่เกิดโดยจุลินทรีย์ การย่อยสลายสารมลพิษจากพืชมักทำให้เกิดสารตัวกลางที่เป็นพิษมากกว่าเดิม และอาจสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อพืช และถ่ายทอดผ่านห่วงโซ่อาหารได้ (Perelo, 2010) ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 กระบวนการ Rhizodegradation

ที่มา: Environmental Biotechnology, 2011b



รูปที่ 2.15 กระบวนการ Phytodegradation
ที่มา: International Environmental Technology Centre, 2000

6) การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช Rhizofiltration

การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช หรือเรียกว่า Rhizofiltration เป็นการใช้พืชเพื่อบำบัดสารมลพิษ โดยการใช้รากพืชในการดักกรองสารมลพิษ หรือดูดซึมสารมลพิษในน้ำ เช่น น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำ ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งวิธีนี้สามารถช่วยในการลดปริมาณสารมลพิษได้ ทั้งนี้เนื่องจากเฉพาะส่วนของรากพืชที่สะสมสารมลพิษเท่านั้นที่จำเป็นต้องบำบัดในขั้นตอนต่อไป ส่วนของใบและลำต้นที่ไม่ปนเปื้อน ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวสามารถนำไปทิ้งหรือนำไปทำประโยชน์อย่างอื่นได้ ขึ้นกับชนิดของพืชที่นำมาใช้ในการบำบัด เช่น พืชบางชนิดมีดอกที่สวยงาม จึงสามารถเก็บดอกไปขายในช่วงเวลาระหว่างการบำบัดได้อีกด้วย ทั้งนี้สารโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี และโครเมียม สำหรับสารกัมมันตรังสีที่สามารถบำบัดโดยวิธีนี้ เช่น ^{137}Cs และ ^{238}U

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.7.2 พืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักในระดับสูง (Hyperaccumulator)

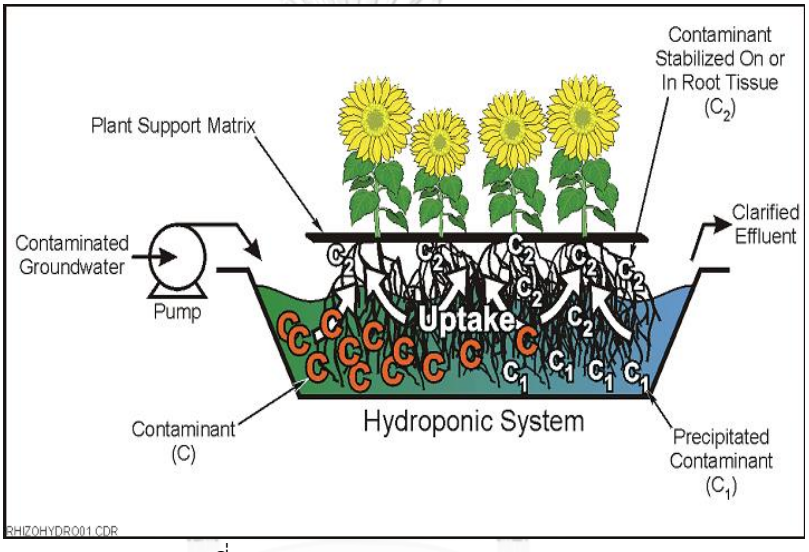
Hyperaccumulator หมายถึง พืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักไว้ในปริมาณที่มากจนผิดปกติ เป็นพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักไว้ได้มากกว่าปริมาณโลหะหนักในดินที่ปลูกถึง 100-1,000 เท่า หรือเป็นพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักได้สูงกว่าพืชทั่วไป 10-500 เท่า (Hasekawa, 2002) ซึ่งพืชที่เป็น Hyperaccumulator มีลักษณะทั่วไปดังนี้

1) พืชมีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักในปริมาณมากเข้าไปภายในรากของพืชได้

2) พืชมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากไปยังส่วนเหนือดินได้ในอัตราสูง

3) พืชมีการสะสมโลหะหนักในปริมาณสูง โดยเฉพาะที่เซลล์ของรากพืชและส่วนที่อยู่เหนือดิน

นอกจากนี้พืชยังมีความสามารถ และทนทานต่อความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในระดับที่สูงกว่าปกติ (Hypertolerance) ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจาก Vacuolar Compartmentalization ซึ่งเป็นกระบวนการลดพิษของโลหะหนักในพืช โดยอาศัยกลไกการขัดขวางของ Vacuole เช่น ความสามารถในการสะสมสังกะสี (Zn) ได้ในปริมาณสูงกว่าปกติของต้น *Thlaspi caerulescens* อันเกิดมาจากการที่สังกะสีไม่สามารถเคลื่อนที่ได้และมีการตกผลึกอยู่ในแวคิวโอล และ Chelation ซึ่งเป็นการจับตัวกับสารประกอบอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (US.EPA., 1999)



รูปที่ 2.16 กระบวนการ Rhizofiltration

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2559ก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.7.3 กลไกการทำงานของ Phytoremediation

การบำบัดสภาพดินที่มีการปนเปื้อนจากสารพิษโดยวิธีการทำ Phytoremediation นั้นขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างไม่ว่าจะเป็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างดิน จุลินทรีย์ ชนิดของพืช รูปแบบ และชนิดของสารปนเปื้อน เป็นต้น นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวคือ สภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ คุณสมบัติของดิน สภาพทางอุทกธรณีวิทยา กลไกของพืช และผลกระทบที่เกิดจากการเกษตรกรรม แต่อย่างไรก็ตาม การทำ Phytoremediation นั้นจะอาศัยกระบวนการสำคัญ ๆ ที่นับว่าเป็นหลักการทำงานของ Phytoremediation ดังนี้ (US.EPA., 2000)

1) การดูดดึงสารปนเปื้อนโดยพืช

สำหรับการดูดดึงสารปนเปื้อนด้วยพืชนั้น วิธีที่อาศัยกระบวนการนี้ ได้แก่ Phytoextraction และ Phytovolatilization ซึ่ง Phytoextraction นั้นจะอาศัยการดูดดึงสารปนเปื้อนจากดินไปเก็บไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืช ส่วนวิธีการ Phytovolatilization นั้นจะอาศัยวิธีการดูดดึงสารปนเปื้อนจากดินแล้วปล่อยออกไปสู่บรรยากาศแทน

2) การกระตุ้นการย่อยสลายทางชีวภาพที่เกิดจากจุลินทรีย์ในดินโดยรากพืช

การกระตุ้นการย่อยสลายหรือทำลายสารมลพิษทางชีวภาพจากจุลินทรีย์ในดินโดยรากพืชนั้น หรือเป็นการกรองสารมลพิษด้วยรากพืช ซึ่งพืชที่นำมาใช้ในกระบวนการนี้จะมีความสามารถในการกรอง ดูดซับ และรับสารมลพิษที่ปนเปื้อนที่อยู่ในรูปของสารละลายรอบ ๆ บริเวณรากหรือเข้าไปในรากของพืชได้ การทำงานของรากพืชจะช่วยให้จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการกำจัดสารมลพิษทำงานได้ดีขึ้น และย่อยสลายสารมลพิษปนเปื้อนต่อไป

3) การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีของดินโดยพืช

การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีของดินโดยพืช เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการปรับสภาพความเป็นพิษของสารปนเปื้อนที่มีอยู่ภายในดินให้มีความเป็นพิษลดลง ซึ่งพืชที่ใช้ในกระบวนการนี้ คือ พืชที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนรูปของสารปนเปื้อนไม่ให้สามารถเคลื่อนที่ได้ หรือเกิดการย่อยสลายไปในที่สุด

2.7.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดึงโลหะหนักในดินและพืช

1) ชนิดของโลหะหนัก

ชนิดของโลหะหนัก มีส่วนสำคัญมากในการที่พืชจะดูดดึงโลหะหนักเหล่านี้ออกจากดิน เนื่องจากพืชนั้นมีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักในแต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน กล่าวคือ พืชจะดูดดึงโลหะหนักชนิดที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าโลหะหนักชนิดที่ส่งผลเป็นพิษต่อพืชอย่างเดียว โลหะหนักโดยทั่วไปมีการเปลี่ยนแปลงวาเลนซ์ซีอยู่เสมอ ในรูปไฮดรอกไซด์จะมีการละลายได้ต่ำ โลหะหนักแต่ละชนิดมีการปลดปล่อยสู่ดิน และซึมสู่ส่วนต่างๆ ของพืชได้แตกต่างกัน เช่น สังกะสี ทองแดง แคดเมียม และนิเกิล พืชมีความสามารถในการดูดซึมไปใช้ได้ดีกว่า ตะกั่ว ปรอท และโครเมียม

2) รูปทางเคมีของโลหะหนัก

รูปทางเคมีของโลหะหนัก การดูดดึงโลหะหนักโดยพืชนั้น ส่วนใหญ่แล้วโลหะหนักอยู่ในรูป Inorganic Salt ที่ละลายน้ำ พืชจึงสามารถดูดดึงเข้าไปใช้ได้มากกว่าโลหะหนักรูป Organic Compound

3) ชนิดของพืชและส่วนต่างๆ ของพืช

พืชแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันไปเป็นผลทำให้ความสามารถของพืชในการดูดดึงโลหะหนักแต่ละชนิด แต่ละรูปแบบก็แตกต่างกันไปด้วย ดังนั้น การดูดดึงโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนัก และอายุของพืช พืชแต่ละชนิดเมื่อได้รับโลหะหนักชนิดเดียวกัน ในอัตราความเข้มข้นที่เท่า ๆ กัน อาจแสดงปฏิกิริยาตอบสนองต่อโลหะหนักได้แตกต่างกัน โดยชนิดของพืชที่เลือกนำมาใช้ดูดดึงโลหะหนักในดินมีความสำคัญมาก ดังนั้น การใช้พืชบำบัดความเป็นพิษของโลหะหนักจึงมีข้อที่ควรคำนึงถึง คือ พืชที่นำมาใช้ในการบำบัดความเป็นพิษของโลหะหนักมีจำนวนมากหรือน้อยในพื้นที่ปนเปื้อน และเกิดแบบต้นเดี่ยวหรือแบบกลุ่ม และมีคุณสมบัติการแสดงความเป็นพิษทางสรีระที่ง่ายต่อการสังเกตการแสดงความเป็นพิษ เช่น อัตราการเจริญเติบโต และลักษณะเข้มของสีใบ เป็นต้น Wang และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาโดยใช้ผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) พบว่า ผักกาดเขียวมีกลไกในการทนทานต่อโลหะหนัก โดยส่วนรากจะมีการสร้างเอนไซม์ เพื่อต้านความเป็นพิษของโลหะหนัก เนื่องจากในสภาพดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก จะมีการกระตุ้นให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระในเซลล์พืชมากขึ้น ซึ่งอนุมูลอิสระนี้จะทำลายเซลล์ของพืช ดังนั้นเอนไซม์ที่ต่อต้านอนุมูลอิสระของผักกาดเขียว จะทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น

4) ลักษณะสมบัติและองค์ประกอบบางอย่างของดิน

(1) เนื้อดิน โครงสร้างของดินเกิดจากการเกาะยึดกันของอนุภาคดิน และมีตัวเชื่อมทั้งสารอินทรีย์และไอออนต่างๆ ทำให้มีความเสถียรของรูปทรง ลักษณะของเนื้อดิน และโครงสร้างของดินซึ่งมีอิทธิพลต่อความพรุนของดิน การอุ้มน้ำ การระบายน้ำ และอากาศ การชอนไชของราก ดังนั้นพื้นที่ผิวสัมผัสของเนื้อดินแต่ละชนิดย่อมมีผลต่อการดูดดึงโลหะหนัก โดยเนื้อดินที่แตกต่างกันสามารถทำให้การดูดดึงโลหะแตกต่างกันไปด้วย โดยดินที่มีพื้นที่ผิวรวมของอนุภาคมากกว่าจะสามารถดูดซับไอออน ซึ่งเป็นธาตุอาหารได้มากกว่าด้วย ลักษณะของโครงสร้างดินที่พืชต้องการ คือ ไม่ขัดขวางการเจริญเติบโตของราก มีการถ่ายเทอากาศ และการระบายน้ำในดินได้ดี สามารถอุ้มน้ำให้กับพืชได้ มีลักษณะเอื้อประโยชน์ต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช เป็นที่ยึดเกาะของรากได้ดี ทั้งนี้ Bell และคณะ (2001) รายงานว่า พืชส่วนใหญ่ที่ปลูกในดินทรายมีความสามารถในการดึงดูดแคดเมียมไปใช้สูงกว่าพืชที่ปลูกในดินเหนียว ทั้งนี้เนื่องจากดินทรายมีปริมาณดินเหนียว และอินทรียวัตถุต่ำ

(2) ความสามารถในการระบายน้ำ การที่ดินมีความสารถในการระบายน้ำได้ดีนั้นสามารถทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปแบบที่ง่ายต่อการที่พืชจะดึงดูดไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้นเช่นกัน

(3) ความสามารถในการดึงดูดโลหะหนัก หากดินดึงดูดจับโลหะหนักไว้อย่างแน่นหนาแล้วโอกาสที่พืชจะดึงดูดไปได้ย่อมลดลงไปด้วย ดังนั้นจึงมักพบว่า พืชมีความสามารถในการดึงดูดและเคลื่อนย้ายโลหะหนักในดินทรายได้ดีกว่าดินเหนียวเสมอ

(4) ความเป็นกรด-ด่างในดิน มีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในดิน โดยค่าความเป็นกรด-ด่างของดินที่เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้กานดึงดูดโลหะหนักของพืชลดลง เนื่องจากไอออนของโลหะหนักต่างๆในรูปที่เปลี่ยนประจุได้ และละลายน้ำได้จะมีปริมาณลดลง เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้น เช่น แคดเมียมสามารถเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.5-5.5 ซึ่งสภาพละลายได้ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็ก และอลูมิเนียม และปริมาณอินทรียวัตถุในดิน อย่างไรก็ตามในขณะที่สภาพความเป็นกรด-ด่างในดินสูงขึ้น จะพบว่า แคดเมียมเคลื่อนที่ได้น้อยหรือไม่เคลื่อนที่เลย จึงทำให้การดูดดึงของแคดเมียมในพืชลดลง

5) สภาพแวดล้อมต่อความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักของพืช

(1) อุณหภูมิ (Temperature) มีผลต่อพืชมาก เนื่องจากเมื่ออุณภูมิสูงขึ้นพืชจะดูดดึงแคดเมียม สังกะสี แมงกานีส และเหล็ก จากดินสู่พืชมากขึ้น

(2) ช่วงวัน (Day Length) มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักของพืชเช่นกัน โดยที่ช่วงวันมากขึ้นพืชจะมีโอกาสในการสังเคราะห์แสงมากขึ้น ทำให้โอกาสที่พืชจะดูดดึงเอาโลหะหนักออกมาจากดินนั้นมีสูงขึ้นด้วย

(3) ปริมาณของแสง (Intensity) มีส่วนในการดูดดึงโลหะหนักของพืชเช่นกัน เนื่องจากแสงที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมกับพืชจะสามารถสังเคราะห์แสงได้ดี ทำให้การดูดดึงโลหะหนักที่อยู่ในดินเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

(4) ความชื้นดิน (Moisture) มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักเข้าสู่พืช โดยพิจารณาจากกระบวนการออสโมซิสที่ต้องมีความเหมาะสมระหว่างความชื้นในดินและชนิดของพืช ที่จะสามารถดูดดึงโลหะหนักออกจากดินได้ด้วย

(5) ความชื้นในอากาศ (Air Humidity) มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักในดินเช่นกัน เนื่องจากความชื้นในอากาศนั้นมีผลต่อการคายน้ำของพืช ถ้าพืชคายน้ำออกมาได้น้อย แรงดึงที่รากก็จะต่ำทำให้พืชดูดดึงสารต่างๆ ในดินได้น้อยลงเช่นกัน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นิภาพร สุวรรณ์ (2549) ศึกษาผลของปุ๋ยหมัก และการใส่ปุ๋ยเคมีต่อการดูดดึงและสะสมโลหะหนักในส่วนต่างๆ ของข้าวโพดฝักอ่อนพันธุ์แปซิฟิค 283 ในชุดดินกำแพงแสน ทำการทดลองในกระถางในโรงเรือนทดลองภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ระหว่างเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2548 ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2549 วางแผนการทดลองแบบ 3x3 Factorial in CRD จำนวน 4 ซ้ำ มี 2 ปัจจัย คือ 1) ปุ๋ยหมัก 3 อัตรา 0, 75 และ 150 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม 2) ใส่ปุ๋ยเคมี ประกอบด้วย ไม่ใส่ปุ๋ยเคมี ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 8 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม และยูเรีย 4 กรัม

ต่อดิน 8 กิโลกรัม ใส่ครั้งเดียวก่อนปลูก และใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 8 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม และยูเรีย 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม โดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ครั้งละครึ่งก่อนปลูก และเมื่อข้าวโพดอายุ 20 วัน ผลการศึกษา พบว่า การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม ทำให้การสะสมสารแคดเมียมทั้งหมดสูงกว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม และการไม่ใส่ปุ๋ยหมัก โดยค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับการไม่ใส่ปุ๋ยหมักทำให้การสะสมตะกั่วทั้งหมดสูงกว่าการใส่ปุ๋ยหมัก 75 และ 150 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม ค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการใส่และไม่ใส่ปุ๋ยหมักทำให้การสะสมปรอท และสารหนูทั้งหมดมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนการใส่ปุ๋ยเคมีโดยใส่ครั้งเดียวทำให้การสะสมตะกั่ว แคดเมียม ปรอท และสารหนูทั้งหมดสูงกว่าการแบ่งใส่ปุ๋ยเคมี 2 ครั้ง และการไม่ใส่ปุ๋ยเคมีโดยมีค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับความเข้มข้นของโลหะหนักในลำต้น และฝักข้าวโพดอ่อน พบว่า ความเข้มข้นของแคดเมียม ตะกั่ว และปรอทในฝักสูงกว่าลำต้น แต่ความเข้มข้นของสารหนูในลำต้นสูงกว่าในฝัก

ปิยะพร วันสม (2549) ศึกษาผลของการใช้ปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมีต่อการดูดกินและสะสมของตะกั่ว แคดเมียม ปรอท และสารหนูในส่วนต้นและเมล็ดของข้าวโพดหวานพันธุ์ ATS-5 ที่ปลูกในชุดดินมวกเหล็ก โดยทำการทดลองในโรงเรือนของภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วางแผนการทดลองแบบ 3x2 Factorial in Completely Randomized Design จำนวน 3 ซ้ำ มี 2 ปัจจัย คือ 1) อัตราปุ๋ยหมัก ได้แก่ ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก ใส่ปุ๋ยหมัก 75 และ 150 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม 2) การใส่ปุ๋ยเคมี (ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 และ ปุ๋ยยูเรีย อย่างละ 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม ประกอบด้วย การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวก่อนปลูก และใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ครั้งละครึ่งหนึ่งของปริมาณทั้งหมดในช่วงก่อนปลูกและเมื่อข้าวโพดอายุ 20 วัน ผลการศึกษา พบว่าปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในลำต้น และเมล็ด โดยปริมาณโลหะหนักทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการใส่ปุ๋ยหมัก สำหรับการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและแบ่งใส่ 2 ครั้งไม่ทำให้ความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม ในลำต้นและเมล็ด และปริมาณตะกั่ว แคดเมียม และปรอททั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานมีความแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในลำต้นและเมล็ด โดยพบว่า ความเข้มข้นของตะกั่ว และสารหนูในส่วนลำต้นมีค่าต่ำกว่าในส่วนเมล็ด ส่วนความเข้มข้นของแคดเมียม และปรอทในส่วนลำต้นสูงกว่าส่วนเมล็ด

ธิดา พานิช และ ศุภเกียรติ ศรีพนมธนากร (2558) ศึกษาผลของการเติมของเสียอินทรีย์ (มูลวัว สลัดจ์น้ำเสีย และปุ๋ยหมักจากขยะชุมชน) ที่มีต่อการดูดดึงตะกั่วโดยทานตะวัน *(Helianthus annuus* L.) จากดินปนเปื้อนตะกั่วในระดับสูง โดยการปลูกพืชในกระถางทดลอง ผลการศึกษา พบว่าการเติมของเสียอินทรีย์โดยเฉพาะมูลวัวที่อัตรา 100-3,000 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อเฮกตาร์ ร่วมกับสารอีดีทีเอในอัตรา 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม มีผลทำให้ทานตะวันมีการเจริญเติบโตให้มวลชีวภาพที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ทำให้ค่าความเข้มข้นของตะกั่วใน ราก ใบ และลำต้นของทานตะวันมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

โดยมีค่าความเข้มข้นของตะกั่วในราก ใบ และลำต้นอยู่ในช่วง 2,218-3,382, 622-3,055 และ 382-959 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างส่วนต่างๆ ของพืชทั้ง 3 ส่วน พบว่าตะกั่วถูกดูดดึง และเก็บสะสมในใบเป็นส่วนใหญ่

พนัส พงศ์ผลาดิศัย (2553) ศึกษาผลของการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีด้วยข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนจากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยการปลูกข้าว 4 สายพันธุ์ ได้แก่ ขาวดอกมะลิ 105 กข6 พิษณุโลก3 และเหนียวสันป่าตอง ในดิน 5 ชุดการทดลอง คือ ดินไม่ปนเปื้อนไม่เติมปุ๋ย ดินปนเปื้อนไม่เติมปุ๋ย ดินปนเปื้อนเติมปุ๋ย 500, 1000 และ 2000 กิโลกรัมต่อไร่ และทำการเก็บตัวอย่างในวันที่ 30, 60, 90, 120 วัน ผลการทดลอง พบว่า ปุ๋ยอินทรีย์ที่ 1000 กิโลกรัมต่อไร่ช่วยตรึงแคดเมียมให้อยู่ในดินได้ และปุ๋ยอินทรีย์ไม่มีผลต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในดินทุกสายพันธุ์ข้าว และทุกชุดดินทดลอง

ภารินี วนาพรรณ์ (2553) ศึกษาผลของปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-8 ต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินและอ้อย โดยการปลูกอ้อยพันธุ์ LK92-11 ในดินปนเปื้อนแคดเมียมจากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยทำการปลูกอ้อยในเรือนทดลอง วางแผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ ปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ อัตราการใส่ปุ๋ยเคมี 16-16-8 ทำการใส่ปุ๋ยเมื่ออ้อยมีอายุ 1 เดือน และหลังจากใส่ครั้งแรก 5 เดือน ในอัตราปุ๋ยเคมี 0, 50, 100, 200 กิโลกรัมต่อไร่ เก็บตัวอย่างดินและอ้อยในเดือนที่ 2, 4, 6 และ 8 ผลการศึกษา พบว่า ประสิทธิภาพการสะสมแคดเมียมในดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเติมปุ๋ยเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการเติมปุ๋ยเคมี 50 กิโลกรัมต่อไร่ พบว่า รากอ้อยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุดเท่ากับ 22.61 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

Trapp และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาการกำจัดพิษของไซยาไนด์ด้วยพืช ได้แก่ ข้าวฟ่าง การทดลองโดยการเตรียมขวดทดลองปริมาตร 250 มิลลิลิตร และเติมไซยาไนด์ที่ระดับความเข้มข้นเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้น้ำกลั่นเป็นตัวควบคุม จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 200 มิลลิลิตร ตัดใบหรือรากปริมาณ 2 กรัม ใส่ขวดทดลอง ปรับพีเอชเป็น 8.5 ด้วย NaOH และวางขวดทดลองบริเวณใกล้หน้าต่าง ควบคุมอุณหภูมิที่ 22±2 องศาเซลเซียส และความชื้นที่ 65±5 เปอร์เซ็นต์ และวิเคราะห์ความเข้มข้นแสงเป็นเวลา 8 วัน จากการทดลองกำจัดไซยาไนด์ด้วยข้าวฟ่างกับไซยาไนด์ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตรมีความสามารถในการกำจัดได้ดีกว่าที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยพืชศึกษาสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้มากถึง 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ใบพืชมีความสามารถในการกำจัดสารพิษอยู่ระหว่าง 3.14-3.5 มิลลิกรัมต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมใบพืช ส่วนรากพืชสามารถกำจัดได้ 2.8 มิลลิกรัมต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมใบพืช นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบว่า เมื่อระยะเวลานานขึ้น ไซยาไนด์สามารถทำให้พืชตาย หากแต่ในระยะเริ่มต้นพืชสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ระหว่าง 3.96-4.68 มิลลิกรัมต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมของใบ ส่วนการกำจัดใน

รากสามารถกำจัดได้มากกว่าใบถึง 4.5-6.94 มิลลิกรัมต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมของราก สำหรับชุดควบคุมที่ไม่มีพืชจะยังสามารถพบไซยาไนด์อยู่ในระดับเช่นเดิม

Morten และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาการกำจัดความเป็นพิษของโพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN) ด้วยต้นปอเทือง (*Salix viminalis*) โดยการตัดปักชำ และบรรจุในถังน้ำภายใต้แสงแดดธรรมชาติ เป็นเวลา 6 สัปดาห์จึงเกิดราก จากนั้นจึงย้ายไปใส่ขวดทดลองปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่ใส่สารอาหารที่มีระดับความเข้มข้นของโปแทสเซียมไซยาไนด์เท่ากับ 0, 0.4, 2, 8 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรไซยาไนด์ และทำการปรับปริมาตรเป็น 400 มิลลิลิตร พีเอช 7.5 ปิดผนึกฝาด้วยจุกไม้ก๊อก อยู่ในสภาวะควบคุมอุณหภูมิ 24.5±5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 45±5 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีไนโตรเจนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาที่ระดับความเข้มข้น 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตรไซยาไนด์ พบว่าพืชสามารถแสดงความเป็นพิษได้ที่บริเวณราก และลำต้น ส่วนที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตรไซยาไนด์ พืชสามารถดูดซับความเป็นพิษได้ที่บริเวณราก สำหรับที่ระดับความเข้มข้น 8 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พืชแสดงความเป็นพิษได้ที่บริเวณรากและใบ และที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรไซยาไนด์ พืชแสดงความเป็นพิษได้ที่บริเวณลำต้น แสดงให้เห็นว่า ปอเทืองมีประสิทธิภาพหรือความสามารถในการกำจัดไซยาไนด์ได้ดีในพื้นที่ที่ปนเปื้อนไซยาไนด์

Xiaozhang และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาการลดลงของไซยาไนด์ในพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ได้แก่ *Sambucus chinensis* และ Snow-pine tree (*Credrus deodara* (Roxb.) Loud) โดยได้ทำการทดสอบกับสารละลายโพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN) และมีการตัดตัวอย่างใบพืชเป็นชิ้นๆ ขนาด 1.5 กรัมของน้ำหนักสด ใส่ในขวดทดลองและเติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับพีเอชเป็น 6.9 ด้วย NaOH ปิดขวดด้วยจุกแก้ว วางไว้ในตู้อบอุณหภูมิคงที่ 23.5 องศาเซลเซียส และทำการทดลอง 2 ครั้ง ได้แก่ ครั้งที่ 1 ควบคุมระดับไซยาไนด์แต่ไม่ควบคุมเนื้อเยื่อของพืช และครั้งที่ 2 ควบคุมเนื้อเยื่อของพืชแต่ไม่ควบคุมระดับไซยาไนด์ ที่ความเข้มข้น 0.83-1.0 มิลลิกรัมต่อไซยาไนด์ เป็นเวลา 4-28 ชั่วโมง จากผลการทดลองครั้งที่ 1 พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้เด่นชัดในระดับความเข้มข้นของไซยาไนด์ ส่วนผลการทดลองครั้งที่ 2 พบว่า ในระยะเวลา 28 ชั่วโมง เกิดการกำจัดไซยาไนด์จากสารละลายในกลุ่มทดสอบ โดยมีปริมาณการกำจัดไซยาไนด์ของพืชได้ ดังนี้ *Sambucus chinensis* สามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ 8.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วน Snow-pine tree (*Credrus deodara* (Roxb.) Loud) สามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ 0.94-0.67 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าความหลากหลายความของสายพันธุ์พืชนั้นสามารถนำไปใช้ในการกำจัดไซยาไนด์ได้แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม Xiaozhang และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดพิษของไซยาไนด์ในพืชที่มีท่อลำเลียงขนาดใหญ่ และเป็นพืชที่อาศัยอยู่บนพื้นดินเป็นส่วนใหญ่ โดยได้มีการนำพืชตระกูล Salicaceae 3 ชนิด ได้แก่ Hybrid willows (*Salix matsudana* Koidz x *Salix alba* L.), Weeping willows (*Salix babylonica* L.) และ Poplar (*Populus deltoides*) มาทำการศึกษา เนื่องจากเป็น

พืชที่มีจำนวนท่อลำเลียงมาก ซึ่งได้ทำการทดลองโดยการตัดต้นท่อนพันธุ์ขนาดความยาว 40 เซนติเมตรจากต้นใหญ่ และนำไปวางในถังน้ำที่อุณหภูมิห้อง 15-20 องศาเซลเซียสในที่มีแสง ภายหลังจากพืชมีการเจริญเติบโตได้ประมาณ 2 เดือน จึงย้ายไปใส่ในขวดทองลองที่มีปริมาตร 250 มิลลิเมตร เติมสารไซยาไนด์ที่มีความเข้มข้น 0.95-1.15 มิลลิกรัมไซยาไนด์ต่อลิตร ในปริมาตร 250 มิลลิลิตร ปิดผนึกฝาขวดป้องกันการเกิดสาหร่ายที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ปรับพีเอชของไซยาไนด์ที่ 6.9 ด้วย NaOH และทำการทดลองด้วยการควบคุมเวลา 2 เวลา คือ 72 ชั่วโมง และ 144 ชั่วโมง ผลการศึกษา พบว่า ในระยะเวลา 72 ชั่วโมง Hybrid willows (*Salix matsudana* Koidz x *Salix alba* L.), Weeping willows (*Salix babylonica* L.) และ Poplar (*Populus deltoides*) สามารถช่วยลดระดับความเข้มข้นของไซยาไนด์ได้เท่ากับ 77.61, 70.41 และ 58.41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่ระยะเวลา 144 ชั่วโมง พืชมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของไซยาไนด์ได้มากถึง 95 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Xiaozhang และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาศักยภาพการสกัด และการเผาผลาญสารประกอบไซยาไนด์ (Ferrocyanide) จากพืช 3 ชนิด ได้แก่ Hybrid willows (*Salix matsudana* Koidz x *Salix alba* L.), Weeping willows (*Salix babylonica* L.) และ Hankow willows (*Salix matsudana* Koidz) โดยวิธีการปลูกในสารละลายไฮโดรโปนิคที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส ควบคุมความชื้นที่ 65 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 6 วัน ผลการศึกษา พบว่า พืชทั้ง 3 ชนิด สามารถช่วยลดปริมาณความเข้มข้นของ Ferrocyanide ได้ประมาณ 8.64, 10.86 และ 15.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Yu และคณะ (2004) ศึกษาประสิทธิภาพของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวในการบำบัดไซยาไนด์ ใช้พืช 28 สปีชีส์ (Species) 23 แฟมิลี่ (Family) โดยทำการทดลองใช้พืชปลูกลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายโพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN) ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายอยู่ในช่วง 0.83-1.0 มิลลิกรัมไซยาไนด์ต่อลิตร เก็บที่อุณหภูมิ 23.5 องศาเซลเซียล เป็นเวลา 28 ชั่วโมง นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยการวัดแสงจากเครื่อง Spectrophotometrically ผลการศึกษา พบว่า พืชที่สามารถบำบัดไซยาไนด์ได้เร็วที่สุด คือ *Sambucus chinensis* มีค่าการสะสมเท่ากับ 8.8 มิลลิกรัมไซยาไนด์ต่อกิโลกรัมน้ำหนักพืชใน 1 ชั่วโมง รองลงมาคือ ผักชีฝรั่ง (*Torilis japonica*) มีค่าการสะสมเท่ากับ 7.5 มิลลิกรัมมไซยาไนด์ต่อกิโลกรัมน้ำหนักพืชใน 1 ชั่วโมง ส่วนพืชที่สามารถบำบัดได้ต่ำที่สุด คือ ต้นสนหิมะ (*Credrus deodara* (Roxb.) Loud.) นอกจากนี้ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่า ความหลากหลายของพันธุ์พืชสามารถบำบัดไซยาไนด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามในปี 2005 Yu และคณะ ได้ทำการศึกษาการตอบสนองของอัตราการเผาผลาญอาหารจากสารไซยาไนด์ โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพืช 2 ชนิด คือ *Salix babylonica* L. และ *Sambucus chinesis* Lindl. ด้วยการนำใบพืชทั้ง 2 ชนิด ปริมาณ 1.0 กรัมน้ำหนักสดของพืช มาเก็บไว้ในภาชนะแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร ที่มีสารละลายโพแทชเซียมไซยาไนด์ (KCN) นาน 28 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

คือ ช่วง 0-10 องศาเซลเซียส และช่วง 11-32 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการวิเคราะห์ไซยาไนด์ที่สูญหายไปด้วยการวัดแสงจากเครื่อง Spectrophotometrically ผลการทดลอง พบว่า อัตราการกำจัดไซยาไนด์ของพืช *Sambucus chinesis* Lindl. สูงกว่า *Salix babylonica* L. ที่อุณหภูมิทั้งหมด โดยอัตราการกำจัดไซยาไนด์สูงสุดของ *Sambucus chinesis* Lindl. พบว่า มีค่าเท่ากับ 12.6 มิลลิกรัมไซยาไนด์ต่อชั่วโมงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอัตราการกำจัดไซยาไนด์สูงสุดของ *Salix babylonica* L. มีค่าเท่ากับ 9.72 มิลลิกรัมไซยาไนด์ต่อชั่วโมงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์ในการกำจัดที่แตกต่างกันเป็นอัตราที่ทำให้การกำจัดไซยาไนด์ของ *Sambucus chinesis* Lindl. และ *Salix babylonica* L. แตกต่างกัน คือ 1.84 และ 2.09 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอัตราการกำจัดไซยาไนด์ของ *Salix babylonica* L. มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่า *Sambucus chinesis* Lindl. ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงมีอิทธิพลอย่างมากต่ออัตราการกำจัดไซยาไนด์โดยพืช

Samiotakis และคณะ (2004) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดดึงเหล็กเชิงซ้อนของไซยาไนด์ โดยใช้พืช 3 ชนิด คือ ข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare*) ข้าวโอ๊ต (*Avena sativa* L.) และข้าวฟ่าง (*Sorghum bicolor* L.) โดยมีการเติมสารเฟอร์โรไซยาไนด์ (Ferrocyanide) ที่ปนเปื้อนเหล็กเชิงซ้อนของไซยาไนด์ จากการศึกษาพบว่า พืชทั้ง 3 ชนิดสามารถดูดดึงและสะสมเหล็กเชิงซ้อนของไซยาไนด์ไว้มากที่สุดในบริเวณส่วนราก (δ15N ‰ = 1000-1500) และบริเวณส่วนยอด (δ15N = 500) แสดงให้เห็นว่า การเติมสารเฟอร์โรไซยาไนด์ ลงไปในดินสามารถทำให้ข้าวบาร์เลย์ และข้าวโอ๊ตมีการดูดดึงเหล็กเชิงซ้อนของไซยาไนด์ไปเก็บสะสมไว้ในรากได้ดี ในขณะที่ข้าวฟ่าง พบว่า การเติมสารเฟอร์โรไซยาไนด์ลงไปมีความสามารถในการดูดดึงเหล็กเชิงซ้อนของไซยาไนด์ในราก และเนื้อเยื่อใกล้เคียงกัน ดังนั้นการเติมสารเฟอร์โรไซยาไนด์ (Ferrocyanide) มีผลต่อการดูดดึงเหล็กเชิงซ้อนของไซยาไนด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Mathias และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาการบำบัดไซยาไนด์ด้วยผักตบชวา (*Eichhonia crassipes*) ซึ่งเป็นพืชที่เจริญเติบโตเร็ว มวลชีวภาพสูง กระจายหรือแพร่พันธุ์ดีได้ทั่วพื้นที่ และมีความทนทานต่อสารไซยาไนด์และโลหะหนักอื่นๆ การศึกษาครั้งนี้ใช้โซเดียมไซยาไนด์ที่ระดับความเข้มข้น 5-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลา 96 ชั่วโมง ผลจากการวิเคราะห์ด้วยสเปคโตรมิเตอร์ชี้ให้เห็นว่า ไซยาไนด์ที่ระดับ 5.8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะถูกกำจัดได้อย่างสมบูรณ์ด้วยผักตบชวาภายใน 23 และ 32 ชั่วโมง ตามลำดับ ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่า ผักตบชวามีความสามารถในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำในระดับการทดลองขนาดเล็กได้

Piccinin และคณะ (2007) ศึกษาการกำจัดไซยาไนด์ของหญ้าพื้นเมืองออสเตรเลีย และพืชทางการเกษตร 4 ชนิด ได้แก่ ต้นถั่วโคลเวอร์สีขาว (*White Clover* CV. Pretige) หญ้าออสซี่ (Wallaby Grass) หญ้าสีแดง (Red Grass) และข้าวฟ่าง (Sorghum) ในพื้นที่การทำเหมืองแร่ทองคำ

ในระยะเวลา 5 เดือน โดยพืชทั้ง 4 ชนิดมีความสามารถในการสะสมทองคำได้ ดังนี้ ถั่วโคลเวอร์สีขาว 26.87 หญ้าออสซี่ 21.64 หญ้าสีแดง 23.78 และข้าวฟ่าง 11.11 กรัมต่อตัน (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ และจากการศึกษาค่าเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อกิโลกรัมไซยาไนด์ มีค่าเท่ากับ 10.33, 0.16, 11.93 และ 1.31 กรัมต่อกิโลกรัม พืชทั้ง 4 ชนิด ตามลำดับ และที่ระดับความเข้มข้นไซยาไนด์เท่ากับ 1.0 กรัมต่อกิโลกรัมไซยาไนด์ มีค่าเท่ากับ 1.20, 0.07, 5.41 และ 5.70 กรัมต่อกิโลกรัมพืชทั้ง 4 ชนิด ตามลำดับ จากการศึกษาแสดงให้เห็นได้ว่า ที่ระดับความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อกิโลกรัมไซยาไนด์ ต้นถั่วโคลเวอร์สีขาว สามารถบำบัดไซยาไนด์ได้มากที่สุด และที่ระดับความเข้มข้น 1.0 กรัมต่อกิโลกรัมไซยาไนด์ พบว่า ข้าวฟ่าง สามารถบำบัดไซยาไนด์ได้มากที่สุด

Nuril และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาวิธีการบำบัดปรอท และไซยาไนด์ในแหล่งน้ำ และนาข้าวบริเวณโดยรอบของเหมืองแร่ทองคำ โดยใช้กระบวนการทางชีวภาพหรือใช้พืชที่มีชีวิต (Green plants) ในการบำบัด ได้แก่ *Lindernia crustacean* (L.) F.M., *Digitaria radicosa* (Presl) Miq, *Paspalum conjugatum* และ *Cyperus Kyllingia* เป็นการศึกษาในบริเวณที่พบปรอท และไซยาไนด์ ผลการศึกษาพบว่า พืชทั้ง 4 ชนิด มีความสามารถในการสะสมปรอทได้ดีบริเวณรากพืช มีค่าเท่ากับ 89.13, 50.93, 1.78 และ 0.77 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมปรอท ตามลำดับ สำหรับพืช *Paspalum conjugatum* และ *Cyperus kyllingia* 2 ชนิดนี้เท่านั้นที่มีความสามารถในการสะสมไซยาไนด์ในบริเวณราก เท่ากับ 16.52 และ 33.16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมไซยาไนด์ ตามลำดับ และจากการทดลองได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ได้แก่ เก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึก 10-40 เซนติเมตรจากตรงกลาง และด้านข้างของแต่ละฝั่งของแม่น้ำ รวมทั้งมีการเก็บตะกอนดินท้องน้ำจากแหล่งน้ำในหลายๆ จุด เช่น จากต้นน้ำ และปลายน้ำ และทำการวิเคราะห์หาปรอทด้วยวิธี Spectrophotometry จากการศึกษาและทดลอง พบว่า การทำเหมืองทองส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำ คือ มีปริมาณความเข้มข้นของปรอท และไซยาไนด์สะสม เท่ากับ 0.1 และ 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับในตะกอนดินท้องน้ำ พบระดับความเข้มข้นปรอท และไซยาไนด์สะสม เท่ากับ 27.61 และ 0.32 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

Manar และคณะ (2011) ศึกษาความแตกต่างทางจลศาสตร์ (Michaelis-Menten) ของการกำจัดไซยาไนด์ด้วยข้าวโพด (*Zea mays* L.) โดยชั่งน้ำหนักใบพืช 1.0 กรัมน้ำหนักสด เก็บไว้ในภาชนะแก้วที่มีขนาด 100 มิลลิลิตรของสารละลายโพแทชเซียมไซยาไนด์ (KCN) ที่อุณหภูมิ 25±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 ชั่วโมง และทำการแบ่งมาใช้ที่ 4 ระดับความเข้มข้นของการบำบัดไซยาไนด์ ตั้งแต่ความเข้มข้นที่ 0.43-7.67 มิลลิกรัมไซยาไนด์ต่อลิตร และทำการวิเคราะห์ไซยาไนด์ที่ถูกดูดดึงออกด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ผลการศึกษา พบว่าความสามารถในการเผาผลาญสูงสุด (Vmax) คือ ข้าวโพดสายพันธุ์ Nongda 108 และ HengFen 1 มีค่าเท่ากับ 22.80 และ 10.80 กิโลกรัมไซยาไนด์ต่อชั่วโมง ตามลำดับ และความสามารถในการเผา

ผลาญต่ำสุด (Vmin) คือ ข้าวโพดสายพันธุ์ Jingke 8 มีค่าเท่ากับ 9.48 กิโลกรัมไซยาไนด์ต่อชั่วโมง และปริมาณความเข้มข้นที่ป้อนเข้าสูงสุด (Kmax) คือ ข้าวโพดสายพันธุ์ Nongda 108 และ HengFen 1 เท่ากับ 7.09 และ 2.57 กิโลกรัมไซยาไนด์ต่อชั่วโมง ตามลำดับ และปริมาณความเข้มข้นที่ป้อนเข้าต่ำสุด (Kmin) คือ ข้าวโพดสายพันธุ์ Jingke 8 มีค่าเท่ากับ 0.90 กิโลกรัมไซยาไนด์ต่อชั่วโมง นอกจากนี้ผลจากการศึกษาในครั้งนี้ยังชี้ให้เห็นได้ว่า การใช้ข้าวโพดสายพันธุ์ Nongda 108 สามารถนำมาใช้เป็นตัวแทนในการบำบัดดินและน้ำที่ปนเปื้อนไซยาไนด์เพื่อลดความเป็นพิษของไซยาไนด์ได้

Chiu และคณะ (2005) ทำการศึกษาความสามารถของหญ้าแฝก และข้าวโพด (*Zea mays*) ในการดูดดึง สารหนู สังกะสี ทองแดง ที่ระดับความเข้มข้น 100, 150 และ 600 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ร่วมกับการใช้สารคีเลต 9 ตัว ได้แก่ NTA, HEIDA, Citric Acid, HEDTA, EGTA, CDTA, EDTA, DTPA และ Malic Acid ที่ระดับความเข้มข้น 0, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 และ 20.0 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวพืช 0, 1, 2, 4, 8, 12, 16 และ 20 วัน ผลการศึกษาพบว่าหญ้าแฝกมีการดูดดึงโลหะหนักได้ดีกว่าข้าวโพด โดยสารคีเลตที่ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน สามารถช่วยเพิ่มการดูดดึงสารหนู 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยประสิทธิภาพการใช้สารคีเลต NTA > HEIDA > HEDTA > Citric Acid > EDTA > EGTA > CDTA > DTPA > Malic Acid และ Zinc 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ประสิทธิภาพการใช้สารคีเลต NTA > HEIDA > HEDTA >CDTA > DTPA > EDTA > Citric Acid > EGTA > Malic Acid และ Copper 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ประสิทธิภาพการใช้สารคีเลต HEIDA > NTA > Citric Acid > CDTA > DTPA > Malic Acid > EDTA > EGTA > HEDTA ซึ่งหญ้าแฝกมีการดูดดึงโลหะหนักดีกว่าข้าวโพดถึง 15–20 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า สารคีเลตสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดดึงสารหนู ทองแดง และสังกะสีได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Marques และคณะ (2008) ศึกษาการสะสมสารหนู นิกเกิล และตะกั่ว โดยใช้พืช *Rubus ulmifolius* ที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนของสารหนู นิกเกิล และตะกั่ว เท่ากับ 3,078, 1,400 และ 135 มิลลิกรัมโลหะหนักต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ ผลการศึกษา พบว่า *Rubus ulmifolius* มีความสามารถในการสะสมสารหนูในราก ลำต้น และใบได้เท่ากับ 277-1,721, 30-133 และ 60-265 มิลลิกรัมสารหนูต่อกิโลกรัมพืช ตามลำดับ และไม่พบการสะสมนิกเกิลในส่วนลำต้นและใบ แต่พบในราก เท่ากับ 48-151 มิลลิกรัมนิกเกิลต่อกิโลกรัมพืช พบการสะสมตะกั่วในราก ลำต้น และใบเท่ากับ 248-1,178, 35-133 และ 25-149 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกิโลกรัมพืช ตามลำดับ และจากการศึกษายังแสดงให้เห็นว่า พืช *Rubus ulmifolius* มีความสามารถในการสะสมสารหนู นิกเกิล และตะกั่วสูงสุดที่บริเวณราก ดังนั้น *Rubus ulmifolius* สามารถนำมาใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสารหนู นิกเกิล และตะกั่วได้

คำหล้า นันทวงศ์ (2554) ศึกษาผลของ NTA และ EDTA ต่อการดูดดึงสารหนูที่ปนเปื้อนในดินด้วยต้นไมยราบ โดยการศึกษาเบื้องต้นได้ทำการทดสอบความเป็นพิษของสารหนูที่มีผลต่อต้นไมยราบ ด้วยการเติมสารไดโซเดียมไฮโดรเจนอาซิเนต ($Na_2HA_sO_4.7H_2O$) ที่มีระดับความเข้มข้นของสารหนูแตกต่างกัน คือ 5, 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200, 300 และ 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และทดสอบ NTA และ EDTA ที่ความเข้มข้น 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน จากนั้นจึงปลูกต้นไยราบเป็นเวลา 1 เดือน ผลการศึกษาเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่า ต้นไมยราบสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีความเข้มข้นของสารหนูน้อยกว่าหรือเทียบเท่า 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ในขณะที่ความเข้มข้นอื่นๆ แสดงอาการความเป็นพืชต่อพืช เช่น ใบและลำต้นแห้งหรือหงิกงอ ส่วน NTA และ EDTA ไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช สำหรับการทดลองหลักได้เติมสารหนูที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ทิ้งไว้ 3 เดือนหลังจากนั้นปลูกต้นไมยราบ 1 ต้นต่อกระถางและเติมสาร NTA และ EDTA แยกกันที่ระดับความเข้มข้น 3 ระดับดังกล่าว จากนั้นเก็บตัวอย่างดินและพืชทุกๆ 30 วัน เป็นเวลา 120 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารหนู ผลการศึกษาพบว่า พืชมีความสามารถในการสะสมสารหนูอยู่ในรากสูงกว่าในลำต้น และใบ โดยค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ซึ่งความเข้มข้นสูงสุดอยู่ที่ระยะเวลา 120 วัน พบว่า รากมีค่าเท่ากับ 29.71 มิลลิกรัมสารหนูต่อกิโลกรัมพืช ส่วนในลำต้น และใบมีค่าเท่ากับ 6.23 และ 6.32 มิลลิกรัมสารหนูต่อกิโลกรัมพืช ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยของสารหนูที่สะสมในทุกส่วนของต้นไมยราบตลอดระยะเวลาการศึกษามีค่าอยู่ในช่วง 2.71-36.03 มิลลิกรัมสารหนูต่อกิโลกรัมพืช และพบว่า มีการสะสมมากที่สุดในชุดการทดลองที่มีการเติมสาร EDTA 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งในการเก็บเกี่ยวที่ระยะเวลาและความเข้มข้นเดียวกันของสารคีเลต พบว่า EDTA มีความสามารถในการเร่งการดูดดึงสารหนูเข้าสู่ต้นไมยราบได้ดีกว่า NTA ทั้งนี้หากมีการศึกษาเพิ่มเติมควรศึกษารายละเอียดในระดับโมเลกุลรวมทั้งปัจจัยจากการเติมปุ๋ยซึ่งอาจมีผลต่อการดูดดึงสารหนูของต้นไมยราบ

Ghosh และคณะ (2014) ศึกษาประสิทธิภาพของหญ้าแฝกในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนขี้เถ้าลอยที่มีแคดเมียม สารหนู สังกะสี ทองแดง นิเกิล และตะกั่ว เป็นองค์ประกอบ การทดลองทำในแปลงทดลองที่มีการนำดินมาผสมกับขี้เถ้าลอย 0, 25, 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาการทดลอง 18 เดือน ผลการศึกษา พบว่า หญ้าแฝกมีการสะสมในส่วนใต้ดิน (ราก) สูงกว่าส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) ที่มีขี้เถ้าลอย 100 เปอร์เซ็นต์ และส่วนใต้ดิน (ราก) ของหญ้าแฝกสามารถสะสมสังกะสี และทองแดงได้สูงสุดคิดเป็น 80 และ 70 มิลลิกรัมโลหะหนักต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งพืช ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่า หญ้าแฝกมีประสิทธิภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนขี้เถ้าลอยที่มีองค์ประกอบของโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้ดี

Ma และคณะ (2015) ศึกษาการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี แมงกานีส ทองแดง แคดเมียม โครเมียม และสารหนู โดยใช้หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (*Pennisetum purpureum* Schumach) ผล

การศึกษา พบว่า พืชที่ศึกษามีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้ทั้งในราก ลำต้น และใบ โดยส่วนใหญ่สะสมไว้ในลำต้นมากที่สุด สำหรับผลการศึกษาการเจริญเติบโต และความทนทาน พบว่า พืชที่ปลูกในบ่อกักเก็บกากแร่ดังกล่าวมีลักษณะแคระแกรนเมื่อเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งพิษจากโลหะหนักทำให้ชีวมวลลดลงประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์จากชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่า หญ้าเนเปียร์ยักษ์สามารถดูดดึงโลหะหนักได้ดี และยังสามารถนำไปใช้ในการผลิตพลังงานทดแทนได้

Yuan และคณะ (2006) ศึกษาประสิทธิภาพการสะสมแมงกานีสของพืช *Phytolacca americana* โดยทำการทดลองในดินที่ปนเปื้อนบริเวณเมืองฮูนาน ประเทศจีน ปลูกในหลุมที่ลึก 30 เซนติเมตร ที่มีระดับความเข้มข้น 123,000, 120,850, 141,775, 93,575, 112,025 และ 115,755 มิลลิกรัมแมงกานีสต่อกิโลกรัมดิน นำตัวอย่างดินและพืชมาย่อยด้วยกรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริก แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแมงกานีสทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรมิเตอร์ ผลการศึกษา พบว่า พืช *Phytolacca americana* มีความสามารถในการสะสมแมงกานีสในใบสูงกว่าในราก คือ 8,000 และ 544 มิลลิกรัมแมงกานีสต่อกิโลกรัมพืช ตามลำดับ ผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า *Phytolacca americana* เป็นพืชที่มีความสามารถในการดูดดึงแมงกานีสได้

Juarez-Santillan และคณะ (2010) ทำการศึกษาการสะสมปริมาณแมงกานีสในพื้นที่การทำเหมืองแร่ Hidalgo ประเทศเม็กซิโก โดยใช้พืช 5 ชนิด ได้แก่ มะเดื่อเม็กซิกัน (*Platanus mexicana*) ผักโขมชายา (*Cnidoscolus multilobus*) ไฟเดือนห้า (*Asclepius curassavica*) มะเขือ (*Solanum diversifolium*) และขลู่ (*Pluchea sympitifolia*) ผลการศึกษา พบว่า บริเวณส่วนใบของมะเดื่อเม็กซิกัน (*Platanus mexicana*) มีการสะสมแมงกานีสสูงสุดเท่ากับ 1,507.69 มิลลิกรัมแมงกานีสต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งพืช ส่วนรากของผักโขมชายามีการสะสมของของแมงกานีสสูงสุดเท่ากับ 1,055.80 มิลลิกรัมแมงกานีสต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และเนื้อเยื่อของผักโขมชายามีการสะสมของแมงกานีสสูงสุด 333.78 มิลลิกรัมแมงกานีสต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และจากการศึกษาครั้งนี้ยังแสดงให้เห็นว่า ผักโขมชายาเป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมแมงกานีสได้มากที่สุด และสามารถช่วยลดการปนเปื้อนของแมงกานีสจากบริเวณพื้นที่ของการทำเหมืองแร่ได้ดี

Yang และคณะ (2008) ทำการศึกษาความทนทาน และความสามารถในการสะสมแมงกานีสของพืช *Schima superba* โดยทำการปลูกพืชในแปลงทดลองที่มีการปนเปื้อนแมงกานีสที่ระดับ 0, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 150 และ 200 มิลลิโมลต่อลิตร จากการศึกษาพบว่า ต้นกล้าเจริญเติบโตได้ดี และไม่มีการแสดงความเป็นพิษจากสารแมงกานีส โดยพบการสะสมแมงกานีสในพืช *Schima superba* ส่วนเหนือพื้นดินมากกว่าในราก โดยมีปริมาณแมงกานีสในดินมากกว่า 40 มิลลิโมลต่อลิตร และมีปริมาณแมงกานีสในใบ และลำต้นทั้งหมดเกินกว่า 10,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพืช *Schima superba* เป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมแมงกานีสได้ในปริมาณมาก

Mulagisi และคณะ (2009) ศึกษาการดูดดึงแมงกานีส สังกะสี แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และโคบอลต์ในบ่อกักเก็บกากแร่ทองคำเมืองลิมโปโป ประเทศแอฟริกาใต้ ด้วยหญ้าท้องถิ่น 5 สายพันธุ์ คือ *Cynodon dactylon*, *Cyperus esculentus*, *Hyparrhenia tamba*, *Hyparrhenia hirta* และ *Paspalum dilatatum* ในบ่อกักเก็บกากแร่ทองคำ A และในบ่อกักเก็บกากแร่ทองคำ B เป็นระยะเวลา 6 เดือน และมีการเก็บตัวอย่างดินกาก 50 ตัวอย่าง และตัวอย่างพืช 50 ตัวอย่าง และนำตัวอย่างดินกากไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักทั้งหมด พบว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักในบ่อกักเก็บกากแร่ [A และ B] เฉลี่ยในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เท่ากับ แมงกานีส [123.0; 118.1] สังกะสี [21.3; 25.3] ทองแดง [26.5; 29.4] ตะกั่ว [4.8; 4.1] แคดเมียม [1.0; 1.0] และโคบอลต์ [1.8; 1.7] ตามลำดับ ของดินตัวอย่าง และพบความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งหมดมีการสะสมในหญ้าสายพันธุ์ *Cynodon dactylon, Cyperus esculentus, Hyparrhenia tamba, Hyparrhenia hirta* และ *Paspalum dilatatum* เท่ากับ 329.5, 318.0, 307.0, 294.5 และ 290.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้จากการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าหญ้าทั้ง 5 สายพันธุ์ มีศักยภาพในการจัดอยู่ในกลุ่มพืชไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์ (Hyperaccumulator)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกพืช

1) กระถางพลาสติก

2) ต้นกระถินเทพา

3) ต้นกระถินยักษ์

4) หญ้าแฝก

5) ไผ่ป่า

6) ปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15

7) ปุ๋ยอินทรีย์ (ปุ๋ยคอก) จากมูลวัว ในพื้นที่จังหวัดพิจิตร

3.1.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

1) พลั่วตักดิน จอบและเสียม

2) ถุงพลาสติก

3) ปากกาทำเครื่องหมาย

4) สายวัด

5) ขวดพลาสติกขนาด 1000 มิลลิลิตร

6) กล่องโฟมสำหรับบรรจุน้ำแข็งเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำ

7) เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนละลาย (DO Meter)

8) เครื่องวัดความเป็นกรดเป็นด่าง (pH Meter)

9) เครื่องวัดค่าศักยภาพออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP Meter)

10) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC Meter)

3.1.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

1) สารเคมี ในการทดลองใช้สารเคมี สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ และพืช เพื่อหาปริมาณไซยาไนด์ แมงกานีสและสารหนู ประกอบด้วย

1.1) Nitric Acid (65% HNO_3)

1.2) Hydrochloric acid (HCl)

1.3) Hydrogen Peroxide (H_2O_2)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.4) Citric Acid ($C_6H_8O7.H_2O$)

1.5) Sodium Hydroxide Anhydrous Pellet (NaOH)

1.6) Potassium Hydroxide Pellet (KOH)

1.7) Acetic Acid, Gracial (CH_3COOH)

1.8) Di-potassium Hydrogen Phosphate Anhydrous (K_2HPO_4)

1.9) Disodium Hydrogen Phosphate Anhydrous (Na_2HPO_4)

1.10) Chloramines T Trihydrate ($CH_3C_6H_4SO_2NClNa.3H_2O$)

1.11) 1-Phenyl-3-Methyl-5-Parazolone ($C_{10}H_{10}N_2O$)

1.12) Bis-1-Phenyl-3-Methyl-5-Parazolone ($C_20H_{18}N_4O2$)

1.13) 1.0 N NaOH (Titrosol. As certified, Ampule or ready to use)

1.14) 0.1 N NaOH (Titrosol. As certified, Ampule or ready to use)

1.15) Pyridine (C_5H_5N)

1.16) Cyanide Standard Solution: As certificate purity 1001±5 mg/L

2) วัสดุในห้องปฏิบัติการ เป็นเครื่องแก้วสำหรับวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ เช่น ขวดรูปชมพู่ ขวดปรับปริมาตร กรวยกรอง แท่งแก้ว กระจกนาฬิกา กระบวกตวง บีกเกอร์ ปิเปต ถ้วยกระเบื้อง ตะแกรงร่อนดิน กระดาษกรองเบอร์ 40 พาราฟิล์ม ถุงซิป และช้อนตักสาร ล้างทำความสะอาดและแช่ด้วยกรด HNO_3 ก่อนนำมาใช้งาน

3) เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

3.1) เครื่องวัดปริมาณออกซิเจนละลาย (DO Meter)

3.2) เครื่องวัดความเป็นกรดเป็นด่าง (pH Meter)

3.3) เครื่องวัดค่าศักยภาพออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP Meter)

3.4) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC Meter)

3.5) เครื่อง Microwave Digestion

3.6) เครื่องอบอุณหภูมิสูง (Oven)

3.7) เครื่องชั่งไฟฟ้าละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance)

3.8) เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer : AAS)

3.2 สถานที่ดำเนินการวิจัย (ดังภาคผนวก ก)

3.2.1 พื้นที่ปลูกพืชทดลอง คือ บ่อเก็บกากโลหกรรมพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ทองคำที่มีการทำเหมืองแร่ทองคำ

3.2.2 ห้องปฏิบัติการ ชั้น 3 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 วิธีดำเนินการศึกษา

3.3.1 การเตรียมพืชทดลอง

พืชที่ใช้ในการศึกษา แบ่งเป็นพืช 2 กลุ่ม ได้แก่

1) พืชใบเลี้ยงคู่ (Dicots Species) ได้แก่ กระถินเทพา และกระถินยักษ์

2) พืชใบเลี้ยงเดี่ยว (Monocots Species) ได้แก่ หญ้าแฝก และไผ่ป่า

โดยพืชทดลองกลุ่มใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ กระถินเทพา และกระถินยักษ์ ใช้เมล็ดพันธุ์หว่าน สำหรับกลุ่มพืชใบเลี้ยงเดี่ยว คือ หญ้าแฝกใช้หน่อ สำหรับไผ่ป่าใช้เมล็ดพันธุ์ ทั้งนี้พืชที่นำมาใช้ในการทดลองควรคัดเลือกต้นที่มีความสมบูรณ์แข็งแรง และขนาดเท่า ๆ กัน

3.3.2 การเตรียมชุดทดลอง

1) แปลงทดลองในพื้นที่ (In-situ) บ่อเก็บกากโลหกรรม แบ่งแปลงทดลองออกเป็น 4 แปลง และขุดหลุมปลูกขนาด 30x30x30 เซนติเมตร (กว้าง-ยาว-ลึก) โดยพืชทดลองแต่ละชนิดมีระยะความห่างที่ไม่เท่ากัน ได้แก่ กระถินเทพา และกระถินยักษ์ ระยะปลูก 2x2 เมตร จำนวน 18 ต้น และหญ้าแฝก และไผ่ป่า ระยะปลูก 1x1 เมตร จำนวน 18 ต้น และปลูกพืชชุดควบคุมโดยไม่ใส่ปุ๋ยบริเวณโดยรอบของแต่ละแปลง (ดังภาคผนวก ข-1)

ทั้งนี้หลุมปลูกได้ทำการใส่โพลิเมอร์ ปริมาณ 1 กิโลกรัมต่อหลุม เพื่อการกักเก็บน้ำและความชื้น และใส่ขี้เถ้าแกลบ 30 กรัมต่อหลุม รวมทั้งใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตราละ 30 กรัมต่อหลุม (คิดเป็น 500 กิโลกรัมต่อไร่) และใส่อีกครั้งในวันที่ 30 ของการทดลอง สำหรับการดูแลรักษาพืชทดลองได้ทำการรดน้ำทุกวัน ๆ ละ ประมาณ 1 ลิตร และหากฝนตกหรือน้ำขังจะไม่ทำการรดน้ำในวันนั้น ๆ

2) โรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ปลูกพืชแต่ละชนิดลงในกระถางที่จัดเตรียมไว้ และปลูกพืชชุดควบคุมที่ไม่เติมปุ๋ย โดยแบ่งเป็น 2 ชุดการทดลอง ได้แก่ (ดังภาคผนวก ข-2)

2.1) ชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 โดยทำการปลูกกระถินเทพา กระถินยักษ์ หญ้าแฝก และไผ่ป่า ชนิดละ 1 ต้นต่อกระถางที่มีกากโลหกรรม 20 กิโลกรัม จำนวน 18 กระถาง และใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 จำนวน 2 ครั้ง โดยใส่ในวันแรกของการทดลอง ปริมาณ 30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กรัม และใส่อีกครั้งในวันที่ 60 ของการทดลอง ปริมาณ 30 กรัม (คิดเป็น 500 กิโลกรัมต่อไร่) และปลูกพืชชุดควบคุมที่ไม่เติมปุ๋ย

2.2) ชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ (ปุ๋ยคอก) โดยทำการปลูกกระถินเทพา กระถินยักษ์ หญ้าแฝก และไผ่ป่า ชนิดละ 1 ต้นต่อกระถางที่มีกากหางแร่ 20 กิโลกรัม จำนวน 18 กระถาง และใส่ปุ๋ยอินทรีย์ (ปุ๋ยคอก) จำนวน 2 ครั้ง โดยใส่เมื่อเริ่มต้นการทดลอง ปริมาณ 30 กรัม และใส่อีกครั้งในวันที่ 60 ของการทดลอง ปริมาณ 30 กรัม (คิดเป็น 500 กิโลกรัมต่อไร่) และปลูกพืชชุดควบคุมที่ไม่เติมปุ๋ย

3.3.3 ระยะเวลาของการทดลอง

การศึกษาครั้งนี้ใช้ระยะเวลาในการทดลองทั้งหมด คือ 180 วัน (6 เดือน) โดยทำการเก็บตัวอย่างพืช และกากโลหกรรม ทุกๆ 30 วัน ตลอดระยะเวลาของการทดลอง คือ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน โดยปฏิบัติการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

3.3.4 การบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต (มวลชีวภาพและความสูง) และความผิดปกติของพืชทดลอง

ตลอดระยะเวลาของการทดลอง และทำการวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate; RGR) ในระหว่างช่วงเวลาหนึ่งๆ และการศึกษาความเป็นพิษ (phytotoxicity) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) อัตราการเจริญเติบโต (Relative Growth Rate; RGR) (Hoffmann, 2002) คำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$RGR = \frac{\ln (W2) - \ln (W1)}{t2 - t1} \qquad (3.1)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

2) การศึกษาความเป็นพิษ บันทึกการแสดงความเป็นพิษที่พืชได้รับที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ180 วัน โดยประเมินจากการสังเกตด้วยสายตา ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดการประเมินได้ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การประเมินด้วยสายตาต่อความเป็นพิษของพืชหลังจากได้รับโลหะหนัก

ระดับความเป็นพิษ (คะแนน)	การแสดงความเป็นพิษของพืชทดลอง
0	พืชปกติไม่มีการเปลี่ยนสีของใบ
1	ความเป็นพิษต่อพืชเล็กน้อย แผ่นใบเริ่มมีสีเหลืองหรือเหลืองซีด
2	ความเป็นพิษต่อพืชเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แผ่นใบเหลืองหรือเหลืองซีด
3	ความเป็นพิษต่อพืชเพิ่มมากขึ้น แผ่นใบเหลืองหรือไหม้ 50 เปอร์เซ็นต์
4	ความเป็นพิษต่อพืชรุนแรง ใบเหลืองหรือไหม้เกือบทั้งแผ่นใบ

ที่มา : การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืช (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558)

หลังจากประเมินความเป็นพิษของพืชหลังได้รับโลหะหนักด้วยสายตาแล้ว คำนวณเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษได้จากสมการ 3-2

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษ} = \frac{(A_0 \times B_0) + (A_1 \times B_1) + (A_2 \times B_2) + (A_3 \times B_3) + (A_4 \times B_4) + (A_5 \times B_5) \times 100}{(A_r \times B_r)} \quad (3.2)$$

เมื่อ A0 คือ จำนวนใบของลักษณะพืชปกติ

B0 คือ คะแนนความเป็นพิษ 0 คะแนน (พืชปกติ)

A1 คือ จำนวนใบที่แผ่นใบเริ่มมีสีเหลืองหรือเหลืองซีด

B1 คือ คะแนนความเป็นพิษ 1 คะแนน (แผ่นใบเริ่มมีสีเหลืองหรือเหลืองซีด)

A2 คือ จำนวนใบที่ลักษณะการแสดงความเป็นพิษเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แผ่นใบเหลืองหรือเหลืองซีด

B2 คือ คะแนนความเป็นพิษ 2 คะแนน (แผ่นใบเหลืองหรือเหลืองซีด)

A3 คือ จำนวนใบที่ลักษณะการแสดงความเป็นพิษต่อพืชเพิ่มมากขึ้น แผ่นใบเหลืองหรือไหม้ 50 เปอร์เซ็นต์

B3 คือ คะแนนความเป็นพิษ 3 คะแนน (แผ่นใบเหลืองหรือไหม้ 50 เปอร์เซ็นต์)

A4 คือ จำนวนใบที่ลักษณะการแสดงความเป็นพิษต่อพืชรุนแรง ใบเหลืองหรือไหม้เกือบทั้งแผ่นใบ

B4 คือ คะแนนความเป็น 4 คะแนน (ใบเหลืองหรือไหม้เกือบทั้งแผ่นใบ)

A5 คือ จำนวนใบที่ลักษณะการแสดงความเป็นพิษต่อพืชรุนแรงมาก ใบพืชเหลืองหรือแห้งไหม้ทั้งใบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

B5 คือ คะแนนความเป็นพิษ 5 คะแนน (ใบพืชเหลืองหรือแห้งไหม้ทั้งใบ)

Ar คือ จำนวนใบทั้งหมดที่เป็นพิษ

Br คือ คะแนนความเป็นพิษสูงสุด 5 คะแนน

3.3.5 การเก็บตัวอย่างพืชและกากโลหกรรม

ตัวอย่างพืชทดลอง ได้ทำการเก็บตัวอย่างตามระยะเวลาของการทดลอง โดยการแยกส่วนของพืชออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ สำหรับพืชใบเลี้ยงคู่ และ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดิน สำหรับพืชใบเลี้ยงเดี่ยว สำหรับตัวอย่างกากโลหกรรมในแปลงทดลอง ได้ทำการเก็บตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างพืชเช่นกัน สำหรับตัวอย่างน้ำที่ใช้รดต้นไม้ได้ทำการเก็บตัวอย่างจำนวน 2 ครั้ง คือ ในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2558 และเดือนมกราคม พ.ศ. 2559

1) ตัวอย่างพืช

เก็บตัวอย่างพืชหลังทำการปลูก ที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150, และ 180 วัน โดยการสุ่มตัวอย่างแบบง่าย (Simple Random Sampling) จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำประปาก่อน 3-4 ครั้ง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น 1 ครั้ง ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แบ่งตัวอย่างพืชออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ สำหรับพืชใบเลี้ยงคู่ ส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินสำหรับพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ชั่งน้ำหนักสดแล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ชั่งน้ำหนักแห้งแล้วทำการบดแบบแยกส่วนของพืชทดลองทั้งสองกลุ่มให้ละเอียด

2) ตัวอย่างกากโลหกรรม

เก็บตัวอย่างกากโลหกรรมหลังทำการปลูกพืช โดยเก็บในหลุมเดียวกันกับที่เก็บพืชทดลองที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน จากนั้นแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก นำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ทำการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 mesh (2 มม.) และนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารหนู แมงกานีส ด้วยเครื่อง Microwave Digestion และ เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer: AAS และไซยาไนด์ทั้งหมด ด้วยเครื่อง UV- Visible Spectrophotometer ส่วนที่สอง นำมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เมื่อแห้งทำการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 mesh (2 มม.) และนำไปวิเคราะห์หาความเป็นกรด-ด่าง (pH) ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน- รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential, ORP) และการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC)

3) ตัวอย่างน้ำ

เก็บตัวอย่างน้ำที่ใช้รดพืชที่ใช้ตลอดการทดลอง 2 ครั้ง คือ ในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ.2558 และเดือนมกราคม พ.ศ. 2559 โดยวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ค่าการนำไฟฟ้า ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน ปริมาณสารหนู ปริมาณแมงกานีส และปริมาณไซยาไนด์

4) เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของพืชทดลอง

จดบันทึกการเจริญเติบโตด้วยการชั่งน้ำหนังสด และน้ำหนักแห้งของพืช คำนวณหาอัตราการเจริญเติบโตที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน และวัดความสูงทุก ๆ สัปดาห์หลังจากปลูกพืชทดลอง

3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) ตัวอย่างพืช ทุกๆ 30 วัน ได้แก่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน ทำการเก็บตัวอย่างพืชในแปลงทดลอง และในโรงเรือนทดลอง และนำตัวอย่างพืชมาล้างน้ำให้สะอาด 3-4 ครั้ง และล้างน้ำกลั่น 1 ครั้ง โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนดังนี้

ตัวอย่างพืช ส่วนที่ 1 นำมาล้างทำความสะอาด นำมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 2-3 ชั่วโมง และนำมาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ สำหรับพืชใบเลี้ยงคู่ และ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดิน สำหรับพืชใบเลี้ยงเดี่ยว และชั่งน้ำหนักสด จากนั้นบดพืชตัวอย่างแบบแยกส่วนให้ละเอียด และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไซยาไนด์ทั้งหมดด้วยวิธี In-house method OR-082-TM (Hattsu and Hatsu, 2002) ด้วยเครื่อง UV- Visible Spectrophotometer ตัวอย่างพืช ส่วนที่ 2 ภายหลังนำมาผึ่งที่อุณหภูมิห้อง แยกส่วนของพืช ชั่งน้ำหนักสด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นบดพืชตัวอย่างแบบแยกส่วนให้ละเอียด และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนู แมงกานีสทั้งหมดด้วยวิธี USEPA Method 3052 (US.EPA., 1996) ด้วยเครื่อง Microwave Digester และ เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer : AAS วิเคราะห์ด้วยระบบ Graphite Furnace

2) ตัวอย่างกากโลหกรรม ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างในแต่ละแปลงทดลองในระยะต่างๆ ตั้งแต่ก่อนการทดลอง โดยทำการเก็บแปลงละ 3-5 จุดที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร ด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างดินรวม (Composite Sample) และนำไปวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่อง pH meter สำหรับการวิเคราะห์ค่าความต่างศักย์ของการเกิดออกซิเดชัน- รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential, ORP) และค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC) วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC Meter) ปริมาณสารหนู แมงกานีสทั้งหมดด้วยวิธี USEPA Method 3052 (US.EPA., 1996) ด้วยเครื่อง Microwave Digestion และ เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer : AAS วิเคราะห์ด้วยระบบ Graphite Furnace และไซยาไนด์ทั้งหมดด้วยวิธี In-house Method OR-082-TM (Hattsu and Hatsu, 2002) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer และทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยวิธีการสกัดลำดับส่วน (Sequential Chemical Extraction) โดยทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักด้วย

วิธีการสกัดลำดับส่วนของกากโลหกรรมในวันที่ 30 ด้วยวิธี Sequential Chemical Extraction (SCE) Tessier et al., 1979 ดังแสดงในภาคผนวก ค

3) ตัวอย่างน้ำ เก็บตัวอย่างน้ำที่ใช้รดพืชที่ใช้ตลอดการทดลอง 2 ครั้ง คือ ในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ.2558 และเดือนมกราคม พ.ศ. 2559 โดยวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ค่าการนำไฟฟ้า ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน- รีดักชัน ปริมาณสารหนู ปริมาณแมงกานีสทั้งหมดด้วยวิธี USEPA Method 3051A (US.EPA., 1998) ด้วยเครื่อง Microwave Digestion และเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer : AAS วิเคราะห์ด้วยระบบ Graphite Furnace และไซยาไนด์ทั้งหมดด้วยวิธี In-house Method OR-082-TM (Hattsu and Hatsu, 2002) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

สำหรับการคำนวณปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ทั้งหมด ดังแสดงในภาคผนวก ง

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูที่ได้จากการทดลองปลูกกระถินเทพา กระถินยักษ์ ไผ่ป่า และหญ้าแฝก ในบ่อเก็บกากโลหกรรม และในเรือนโรงทดลอง และปริมาณการสะสมไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนู ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) และการเปรียบเทียบระหว่างชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) เมื่อพบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ จึงนำผลการทดลองดังกล่าวมาวิเคราะห์ความแตกต่างของผลการทดลองแต่ละชุดการทดลอง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ในแต่ละระยะเวลาในการทดลอง โดยโปรแกรม ทางสถิติ ANOVA แบบ One-Way ANOVA เพื่อหาความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ถ้าแตกต่างกันจะทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลชุดการทดลองใดที่แตกต่างจากชุดการทดลองอื่นๆ ด้วยวิธีการของ Duncan’s New Multiple Range Test (DMRT) โดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติดังกล่าวนั้นจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ คือ Statistical Package for the Social Science (SPSS)

บทที่ 4
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาผลของการใช้ปุ๋ยต่อการดูดดึงไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนู ด้วยพืช 2 กลุ่ม คือ 1) พืชใบเลี้ยงเดี่ยว ได้แก่ กระถินเทพา และกระถินยักษ์ 2) พืชใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ หญ้าแฝก และไผ่ป่า โดยทำการทดลองในพื้นที่บ่อเก็บกากโลหกรรม (In-situ) ประกอบด้วย 8 ชุดการทดลอง คือ พืชใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ 1) กระถินเทพา (ควบคุม) 2) กระถินยักษ์ (ควบคุม) 3) หญ้าแฝก (ควบคุม) 4) ไผ่ป่า (ควบคุม) 5) กระถินเทพา 6) กระถินยักษ์ 7) หญ้าแฝก และ 8) ไผ่ป่า และการทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ประกอบด้วย 12 ชุดการทดลอง คือ พืชใบเลี้ยงคู่ จำนวน 6 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) กระถินเทพา (ควบคุม) 2) กระถินยักษ์ (ควบคุม) 3) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี 4) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี 5) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ และ 6) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ และพืชใบเลี้ยงเดี่ยว 6 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) หญ้าแฝก (ควบคุม) 2) ไผ่ป่า (ควบคุม) 3) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี 4) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี 5) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ และ 6) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ ที่ระยะเวลาของการทดลอง 180 วัน โดยมีการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปผลการทดลอง ได้ดังนี้

4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของกากโลหกรรมในแปลงทดลอง

การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างกากโลหกรรมในพื้นที่ศึกษาหรือแปลงทดลองก่อนทำการทดลอง โดยกากโลหกรรมที่ใช้ในการทดลองเป็นกากโลหกรรมจากบ่อเก็บกากโลหกรรมพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่ทองคำที่มีการทำเหมืองแร่ทองคำ ผลการวิเคราะห์สมบัติกากโลหกรรมเบื้องต้น พบว่า ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) กากโลหกรรมมีปริมาณสารหนู (As) แมงกานีส (Mn) และไซยาไนด์ (CN) อยู่ในช่วง 50.18-51.36, 1,670.62-1,670.91 และ 0.10-1.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (mg/kg) ตามลำดับ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ระหว่าง 6.67-6.72 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) มีค่าระหว่าง 1,847.00-1,930.50 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (µS/cm) สำหรับชุดการทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) กากโลหกรรมมีปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์เริ่มต้น อยู่ในช่วงเท่ากับ 50.00-51.55, 1,670.60-1,670.92 และ 0.14-1.21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 6.34-6.72 ค่าการนำไฟฟ้า มีค่าระหว่าง 1,606-1,937 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (ดังตารางที่ 4.1) โดยสามารถสรุปได้ว่า กากโลหกรรมของทั้งชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีความเป็น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กรดอ่อน ไม่มีความเป็นกรดรุนแรง สามารถนำมาใช้เพื่อการปลูกพืชได้แต่ต้องพิจารณาด้านธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชด้วย และมีความสำคัญกล่าวคือ สามารถเป็นตัวควบคุมการละลายแร่ธาตุในกากโลหกรรมให้ออกมาในรูปของสารละลาย (Soluble) ในน้ำหรือดินที่พืชสามารถนำไปใช้ได้สำหรับค่าการนำไฟฟ้า สามารถกล่าวได้ว่า กากโลหกรรมไม่มีความเค็มที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อการทดลองด้วยพืชเช่นกัน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของกากโลหกรรมแปลงทดลอง (In-situ) และโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

พารามิเตอร์	ค่าที่วิเคราะห์ได้							
	ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)				ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)			
	กระถินเทพา	กระถินยักษ์	หญ้าแฝก	ไผ่ป่า	กระถินเทพา	กระถินยักษ์	หญ้าแฝก	ไผ่ป่า
ความเป็นกรด-ด่าง	6.67[a] ±0.07	6.70[a] ±0.05	6.72[a] ±0.39	6.71[a] ±0.25	6.72[a] ±0.09	6.34[b] ±0.15	6.67[a] ±0.25	6.72[a] ±0.33
การนำไฟฟ้า (µS/cm)	1,930.50[a] ±1.12	1,890.00[b] ±1.44	1,847.00[b] ±1.23	1,900.[01aa] ±2.01	1,792.00[c] ±1.78	1,847.00[b] ±1.45	1,937.09[a] ±1.66	1,606.13[c] ±2.04
ปริมาณสารหนู (mg/kg)	51.36[a] ±0.85	50.99[a] ±76	50.18[a] ±0.55	51.00[a] ±56	50.18[a] ±12	51.55[a] ±0.10	51.36[a] ±0.11	50.00[a] ±0.15
ปริมาณแมงกานีส (mg/kg)	1,670.62[a] ±0.19	1,670.91[a] ±0.11	1,670.65[a] ±0.26	1,670.88[a] ±0.40	1,670.60[a] ±0.33	1,670.62[a] ±0.45	1,670.92[a] ±0.32	1,670.62[a] ±0.51
ปริมาณไซยาไนด์ (mg/kg)	1.23[a] ±1.53	0.10[b] ±1.49	0.10[b] ±2.53	1.11[a] ±2.83	0.30[b] ±3.53	1.21[a] ±3.13	0.14[b] ±2.89	0.18[b] ±3.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำที่ใช้รดพืชทดลอง

การทดลองในครั้งนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ใช้รดพืชตลอดระยะเวลาของการทดลองจำนวน 2 ครั้ง คือ ในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2558 และเดือนมกราคม พ.ศ. 2559 โดยมีการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของน้ำ ได้แก่ ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (DO) การนำไฟฟ้า (EC) ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) ปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ แสดงให้เห็นได้ว่า น้ำที่ใช้รดต้นไม้เทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการใช้ประโยชน์ประเภทที่ 3 คือ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อการอุปโภค และบริโภค โดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติ และผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน และพบว่า มีเพียงปริมาณสารหนูที่เกินกว่าค่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีปริมาณสารหนูเท่ากับ 0.21 มิลลิกรัม

ต่อลิตร (mg/L) ปริมาณแมงกานีส 0.31 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) สำหรับปริมาณไซยาไนด์ไม่สามารถตรวจพบได้ เนื่องจากระดับความเข้มข้นของไซยาไนด์มีปริมาณต่ำกว่า 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีค่าเท่ากับ 8.80 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่า น้ำมีความสะอาดและมีการปนเปื้อนสารอินทรีย์น้อย และไม่เป็นอันตรายต่อพืชทดลอง และในส่วนค่าการนำไฟฟ้านั้นมีความสอดคล้องกับปริมาณโลหะหนัก ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวชี้บ่งปริมาณไอออนรวมในน้ำได้ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรด-ด่าง พบว่า สมบัติน้ำมีความเป็นกรดอ่อนเล็กน้อยถึงเป็นกลาง ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำที่ใช้รดพืชทดลอง

คุณสมบัติของน้ำ	ค่าที่ตรวจวัดได้/หน่วย
ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (DO)	8.80 mg/L
ค่าการนำไฟฟ้า (EC)	1,858.67 µS/cm
ค่าพีเอช	6.3-6.8
ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน รีดักชัน (ORP)	290.23 mV
ปริมาณสารหนู	0.2101 mg/L
ปริมาณแมงกานีส	0.3087 mg/L
ปริมาณไซยาไนด์	ND

หมายเหตุ : Detection limit การวิเคราะห์ไซยาไนด์ (LOD) 0.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ the Limit of Quantitation (LOQ) 0.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

4.3 สมบัติกากโลหกรรมตลอดระยะเวลาของการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สมบัติกากโลหกรรมตลอดระยะเวลาของการทดลอง สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ ได้ดังนี้

4.3.1 ความเป็นกรด-ด่าง

การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ของกากโลหกรรมภายหลังทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) ชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ประกอบด้วย 8 ชุดการทดลอง 2) ชุดการทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) 12 ชุดการทดลอง และจากผลการศึกษาชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในกากโลหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากเวลาเริ่มต้นของการทดลองถึง 180 วัน โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้น เท่ากับ 6.01, 6.02, 6.23, 6.23, 6.72, 6.34, 6.78 และ 6.72 ตามลำดับ ของชุดการทดลองทั้งหมด คิดเป็นค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6.38 หรืออยู่ในช่วง 6.01-6.78 และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีค่าเท่ากับ 7.01, 7.01, 7.45, 7.47, 7.77, 7.82, 7.67 และ 7.68 ตามลำดับ ของชุดการทดลองทั้งหมด สำหรับชุดการ

ทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในกากโลหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกันจากเวลาเริ่มต้นของการทดลองถึง 180 วัน โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้น เท่ากับ 6.00, 6.01, 6.81, 6.59, 6.88, 6.40, 6.50, 6.51, 6.85, 6.78, 6.85 และ 6.75 ตามลำดับ ของชุดการทดลองทั้งหมด และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีค่าเท่ากับ 7.35, 7.34, 7.45, 7.82, 7.56, 7.85, 7.45, 7.46, 7.63, 7.68, 7.64 และ 7.64 ตามลำดับ ของชุดการทดลองทั้งหมด คิดเป็นค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.57 หรืออยู่ในช่วง 7.34-7.85 ทั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของทั้งชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดการทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีค่าอยู่ในช่วง 6.01-7.85 ดังนั้นพืชสามารถดูดดึงธาตุอาหาร และโลหะหนักในกากโลหกรรมในรูปที่สามารถละลายน้ำได้ (Soluble) ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นประจุบวก เพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและเพิ่มมวลชีวภาพของพืช จึงอาจเป็นผลทำให้ความเป็นกรด-ด่างของกากโลหกรรมมีค่าเพิ่มขึ้น (Blamey และคณะ, 1987) นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้น ส่วนหนึ่งอาจเนื่องมาจากการชะล้างของน้ำที่ใช้รดต้นพืช และน้ำฝน และเมื่อเปรียบเทียบพืชแต่ละชนิดกับการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างในกากโลหกรรม พบว่า พืชแต่ละชนิดทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในกากโลหกรรมเพิ่มขึ้น โดยค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งความเป็นกรด-ด่าง เป็นคุณสมบัติที่สำคัญและมีอิทธิพลต่อกระบวนการทางเคมี และชีวภาพของดินที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตของพืช โดยปกติค่าความเป็นกรด-ด่างของดินจะส่งผลโดยตรงต่อการยึดเกาะของโลหะหนักในดิน เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของดินต่ำลงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยึดเกาะในดินลดลงตามไปด้วย ยกเว้นสารหนู และแมงกานีสจัดเป็นโลหะหนักที่มีประสิทธิภาพในการยึดเกาะที่ลดลง เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของดินสูงขึ้น ทำให้พืชสามารถดูดดึงนำไปใช้ได้มากขึ้น ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการยึดเกาะโลหะหนักของดินจะลดลงเมื่อความเป็นกรด-ด่างมีค่าประมาณ 5-8 (Hodgson, 1963)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.2 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้าจากกากโลหกรรมภายหลังทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) ชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และ 2) ชุดการทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) จากผลการศึกษาชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าในทุกชุดทดลองมีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้น (วันที่ 0) เท่ากับ 1,256.89, 1,278.99, 1,931, 1,606, 1,792, 1,847, 1,931 และ 1,606 ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร ตามลำดับ ของชุดการทดลอง และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีค่าเท่ากับ 399, 390, 479, 490, 442, 691.67, 334.67 และ 419.67 ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร ตามลำดับ ของชุดการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 448.25 ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร หรืออยู่ในช่วง 334.67-691.67 ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร สำหรับชุดการทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) พบว่ามีค่าการนำไฟฟ้าเริ่มต้น (วันที่ 0) เท่ากับ 1,792.00, 1,847.00, 1,786.66, 1,847.66, 1,760.66,

1,850.66, 1,931, 1,606, 1,941.66, 1,608.33, 1,941.66 และ 1,617 ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร ตามลำดับ ของชุดการทดลอง และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีค่าเท่ากับ 442.00, 691.67, 500.33, 846.66, 261.66, 726, 334.67, 419.67, 316.66, 532.33, 222.73 และ 566 ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร ตามลำดับ ของชุดการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 488.36 หรืออยู่ในช่วง 222.73-846.66 ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากค่าการนำไฟฟ้าผกผันกับค่าความเป็นกรด-ด่าง เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าการละลายของสารละลายลดลง จึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้อาจเกิดเนื่องจากการเจริญเติบโตของพืชมีการดูดดึงธาตุอาหารซึ่งเป็นธาตุที่มีประจุไปใช้ในการเจริญเติบทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง (ยงยุทธ โอสถสภา, 2542)

4.3.3 ค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน

สำหรับค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน พบว่า ในทุกชุดทดลองมีค่าแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับค่าการนำไฟฟ้า โดยชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) มีค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน เริ่มต้น (วันที่ 0) เท่ากับ 250.00, 265.00, 256.00, 250.00, 298.60, 332.20, 270.1 และ 255.5 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ของชุดการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 272.17 หรืออยู่ในช่วง 250.00-322.20 และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีค่าเท่ากับ 211.22, 210.44, 278.11, 259.55, 272.33, 293.27, 295.5 และ 279.77 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ของชุดการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 262.52 หรืออยู่ในช่วง 210.44-295.5 และชุดการทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันเริ่มต้น (วันที่ 0) มีค่าเท่ากับ 298.60, 332.20, 295.97, 332.70, 296.27, 332.76, 270.10, 255.50, 270.77, 256.40, 272.47 และ 255.70 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ของชุดการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 289.11 หรืออยู่ในช่วง 255.50-332.76 และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีค่าเท่ากับ 272.33, 293.27, 289.60, 282.27, 289.97, 301.57, 295.50, 279.77, 297.93, 276.83, 297.87 และ 276.37 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ของชุดการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 287.77 หรืออยู่ในช่วง 272.33-301.57 ทั้งนี้พบว่าเมื่อกากโลหกรรมมีการระบายอากาศดีจุลินทรีย์เจริญเติบโตดีและมีอัตราการหายใจมีมากกว่าอัตราการแพร่กระจายออกซิเจนบนผิวดินลงสู่ในดิน จึงทำให้กากโลหกรรมเริ่มขาดออกซิเจน จุลินทรีย์ที่สามารถใช้สารอื่นแทนออกซิเจนได้จะเป็นตัวรับอิเล็คตรอนในกระบวนการหายใจจึงทำให้ จุลินทรีย์เติบโตได้ดี ค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำลง ค่าความต่างศักดิ์ออกซิเดชั่น-รีดักชั่นลดลง จึงส่งผลให้โลหะหนักละลายในดินได้มากขึ้น พืชดูดดึงได้เพิ่มขึ้น ซึ่งพืชทดลองมีการดูดดึงธาตุอาหารที่มีการแตกตัวเป็นไอออน และนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น โดยแร่ธาตุที่เป็นสารอาหารของพืช (Nutrient) หรือสารจำพวกโลหะหนักที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ (Soluble) หรือมีสภาพที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ จึงทำให้ค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน รีดักชัน มีค่าลดลงเช่นเดียวกับค่าการนำไฟฟ้า (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช และนิตยา รื่นสุข, 2556)

4.4 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยวิธีการสกัดลำดับส่วน

SCE คือ Sequential Chemical Extraction มีรากฐานมาจากทฤษฎีที่กล่าวว่า โลหะรูปแบบที่ถูกเคลื่อนย้ายได้ดี (มี Mobility สูง) จะถูกแยกออกมาได้ก่อน ส่วนรูปแบบอื่นๆ จะแยกออกมาภายหลัง ไล่ตามลำดับ Mobility จากสูงไปต่ำซึ่ง SCE มีหลายวิธีโดยมากมีความแตกต่างกันตรงสารสกัดที่ใช้ในการวิเคราะห์ แต่ทุกวิธีตั้งอยู่บนหลักการและแนวคิดดังกล่าว โดยทั่วไป SCE สามารถแยกโลหะออกเป็น 5 รูปแบบ (Tessier และคณะ, 1979; Maiz และคณะ, 2000) ได้แก่

1) รูปแบบแลกเปลี่ยนได้ง่าย (Exchangeable)

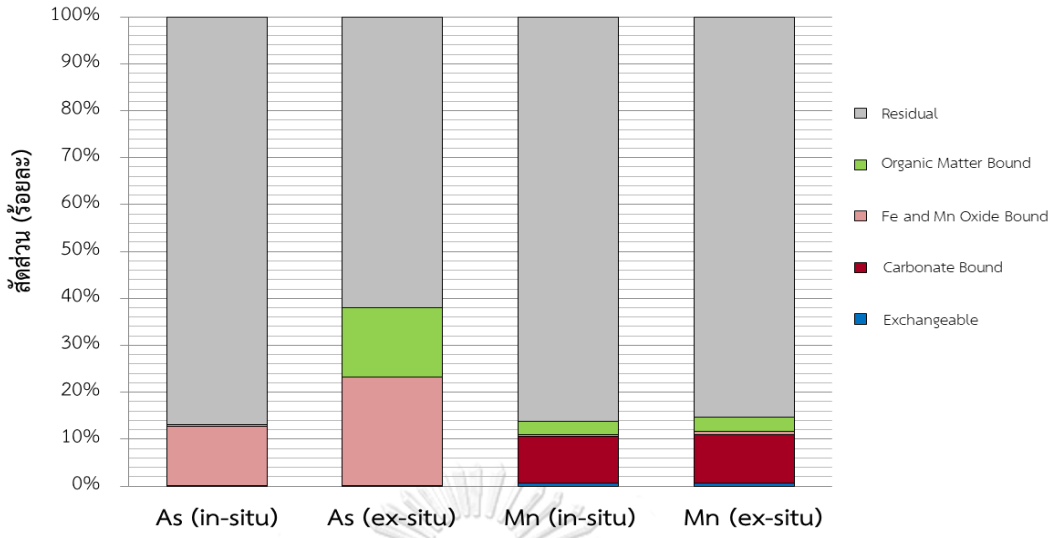
2) รูปสารประกอบกับคาร์บอเนต (Carbonate Bound หรือ Weakly Absorbed)

3) รูปสารประกอบกับเหล็ก-แมงกานีสออกไซด์ (Fe and Mn Oxide Bound หรือ Hydrousoxide Bound)

4) รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ (Organic Matter Bound หรือ Organic Bound)

5) รูปที่คงค้างกับของแข็ง (Residual หรือ Lattice Material Components)

ตามปกติโลหะที่ไม่ได้มีอยู่เดิมในดิน จะอยู่ในรูปที่ 1-4 ส่วนที่มีอยู่ตามธรรมชาติมักจะอยู่ในรูปที่คงค้างกับของแข็ง (Ratuzny และคณะ, 2009) โดยขั้นตอนการสกัดแยกของ SCE เริ่มจากการแยกรูปแบบแลกเปลี่ยนได้ง่ายออกมาก่อน โดยใช้สารละลายที่ทำให้ไอออนองค์ประกอบของสารละลายดินเปลี่ยนไป โลหะที่ถูกดูดซับด้วยการแลกเปลี่ยนประจุบนพื้นที่ผิวภายนอกของอนุภาคดิน จึงแยกออกมาสู่สารละลายสกัดที่ใช้ในขั้นตอนนี้ส่วนใหญ่ ได้แก่ สารละลายเกลือชนิดต่าง ๆ ทั้งนี้เมื่อแยกโลหะส่วนแรกออกไปแล้วจะทำการเปลี่ยนสารสกัดเพื่อแยกโลหะในรูปแบบถัดมา คือ สารประกอบกับคาร์บอเนต เนื่องจากคาร์บอเนตละลายในกรด สารสกัดในขั้นตอนนี้จึงใช้สารละลายกรด ต่อมา คือ การแยกโลหะรูปสารประกอบกับเหล็ก-แมงกานีสออกไซด์สารสกัดที่ใช้ คือ สารที่สามารถละลายเกลือซัลไฟด์ประเภทที่ไม่ละลายน้ำ ทั้งนี้เพราะออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสจะละลายในสภาวะ Reducing ดังนั้นสารที่สามารถละลายเกลือซัลไฟด์ (พบในสภาพ Anoxic) ก็จะละลายออกไซด์ดังกล่าวได้ด้วย ลำดับถัดไปเป็นการแยกโลหะที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ โดยใช้สารสกัดที่เป็น Oxidizing Agent เพื่อ Oxidize สารอินทรีย์ให้เปลี่ยนสภาพโลหะที่ถูกตรึงอยู่ให้แยกออกมา และในลำดับสุดท้าย สารสกัดที่ใช้จะเป็นสารละลายที่สามารถทำลายโครงสร้างผลึกของแร่ปฐมภูมิและทุติยภูมิ ได้แก่ สารละลายกรดแก่ชนิดที่ละลายสารประกอบซิลิเกตได้ดี (Tessier และคณะ, 1979)



รูปที่ 4.1 ร้อยละของปริมาณสารหนูและแมงกานีสด้วยการสกัดลำดับส่วนในกากโลหกรรมของพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในเรือนโรงทดลอง (Ex-situ)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูและแมงกานีสของกากโลหกรรมในพื้นที่บ่อเก็บกากหโลหกรรม (In-situ) และในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ด้วยการสกัดลำดับส่วน (ดังรูปที่ 4.79) พบว่า ปริมาณสารหนูและแมงกานีสอยู่ในรูปแบบที่แตกต่าง ดังนี้

1) สารหนูในกากโลหกรรมของชุดแปลงทดลอง (As; In-situ)
อยู่ในรูป F5 > F3 > F4 > F2, F1

2) สารหนูในกากโลหกรรมของชุดโรงเรือนทดลอง (As; Ex-situ)
อยู่ในรูป F5 > F3 > F4 > F2, F1

3) แมงกานีสในกากโลหกรรมของชุดแปลงทดลอง (Mn; In-situ)
อยู่ในรูป F5 > F2 > F4 > F1 > F3

4) แมงกานีสในกากโลหกรรมของชุดโรงเรือนทดลอง (Mn; Ex-situ)
อยู่ในรูป F5 > F2 > F4 > F3 > F1

ดังนั้นจากผลการศึกษาปริมาณสารหนูและแมงกานีสด้วยการสกัดลำดับส่วน เรียงลำดับจากมากไปหาน้อย สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณสารหนูในพื้นที่บ่อเก็บกากโลหกรรม (In-situ) พบว่า รูปสารหนูที่คงค้างอยู่กับของแข็งมีค่าถึง ร้อยละ 86.93 รูปสารประกอบกับเหล็ก-แมงกานีสออกไซด์มีค่าร้อยละ 12.69 รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ ร้อยละ 0.35 รูปสารประกอบกับคาร์บอเนต ร้อยละ 0.02 และรูปแบบแลกเปลี่ยนได้ง่าย ร้อยละ 0.02 สำหรับปริมาณสารหนูในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) พบว่า รูปที่คงค้างอยู่กับของแข็งมีค่าถึง ร้อยละ 62.01 รูปสารประกอบกับเหล็ก-แมงกานีสออกไซด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ร้อยละ 23.12 รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ ร้อยละ 14.83 รูปสารประกอบกับคาร์บอเนต ร้อยละ 0.02 และรูปแบบแลกเปลี่ยนได้ง่าย ร้อยละ 0.02 นอกจากนี้ปริมาณแมงกานีสในพื้นที่บ่อเก็บกากโลหกรรม (In-situ) พบว่า รูปที่คงค้างกับของแข็ง ร้อยละ 86.23 รูปสารประกอบกับคาร์บอเนต ร้อยละ 10.0 รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ ร้อยละ 2.74 รูปแบบแลกเปลี่ยนได้ง่าย ร้อยละ 0.65 และรูปสารประกอบกับเหล็ก-แมงกานีสออกไซด์ ร้อยละ 0.38 สำหรับปริมาณแมงกานีสในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) พบว่า รูปที่คงค้างกับของแข็ง 85.29 รูปสารประกอบกับคาร์บอเนต ร้อยละ 10.36 รูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ ร้อยละ 3.08 รูปสารประกอบกับเหล็ก-แมงกานีสออกไซด์ ร้อยละ 0.69 และรูปแบบแลกเปลี่ยนได้ง่าย ร้อยละ 0.58 จึงสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณสารหนูและแมงกานีสสามารถพบในรูปที่คงค้างกับของแข็ง (Residual หรือ Latticematerial Components) (F5) ทั้งนี้เนื่องจากกากโลหกรรมที่นำมาศึกษาเป็นเทหวัตถุที่เกิดจากสภาพทางธรรมชาติประกอบกับลักษณะทางของธรณีวิทยาของชั้นหินในพื้นที่ศึกษาที่มีสารหนู และแมงกานีสเป็นองค์ประกอบ ซึ่งผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยวิธีการสกัดลำดับส่วนในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Paulo และคณะ (2011) ที่รายงานว่าพบ โครเมียม (Cr), ทองแดง (Cu), ตะกั่ว (Pb), และสังกะสี (Zn) มีการตกค้างมากในส่วนที่เป็นของแข็งเหลืออยู่มาก เนื่องจากตัวอย่างที่นำมาใช้ในการศึกษาเป็นกากหางแร่ที่เหลือจากกิจกรรมการทำเหมือง ซึ่งสภาพทางธรณีวิทยาของพื้นที่ที่ทำการศึกษามีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ และ Adaikpoh (2011) ที่รายงานว่า ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) พบมากในส่วนของแข็งที่เหลือตกค้างอยู่ เนื่องจากในชั้นหินแร่ของดินบริเวณที่ทำการศึกษามีธาตุสังกะสีเป็นองค์ประกอบอยู่สูง อีกทั้งมีการปนเปื้อนของตะกั่วที่เกิดจากภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ Kashem และคณะ (2007) ยังพบว่า ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) มีของแข็งตกค้างมากหรือเป็นส่วนที่เหลือตกค้างมาก อีกทั้ง Hanzhou และคณะ (2009) และ Jaradot และคณะ (2006) รายงานว่า พบ แมงกานีส (Mn) มากในส่วนที่ถูกตรึงอยู่กับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์อยู่ และสังกะสี (Zn) พบมากในส่วนของแข็งที่เหลือตกค้าง

4.5 อัตราการเจริญเติบโตของพืชทดลอง

4.5.1 มวลชีวภาพ (Biomass)

การศึกษาอัตราการเจริญเติบโตของพืชทดลองด้านน้ำหนักแห้ง โดยทำการเก็บข้อมูลหลังจากเก็บตัวอย่างพืชในวันที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน ซึ่งได้ทำการชั่งน้ำหนักภายหลังจากนำพืชทดลองไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ โดยแบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง คือ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง

(Ex-situ) ของพืช 2 กลุ่ม คือ พืชใบเลี้ยงเดี่ยว และพืชใบเลี้ยงคู่ สามารถแสดงผลการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งได้ดังนี้

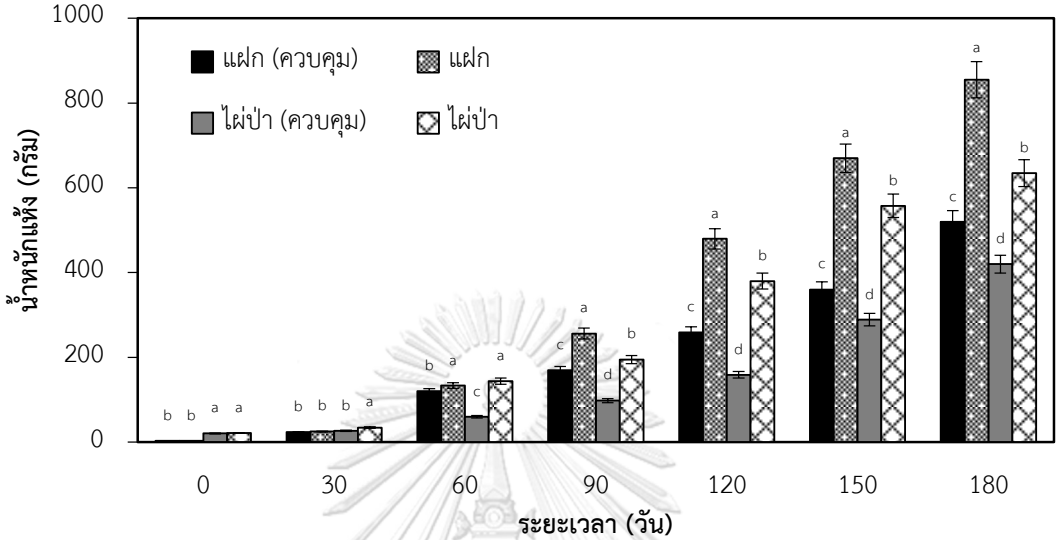
1) พืชใบเลี้ยงเดี่ยว (ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง In-situ)

จากการศึกษาการเจริญเติบโตของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ที่ทำการปลูกในแปลงทดลอง ประกอบด้วย หญ้าแฝก และไผ่ป่า (ดังรูปที่ 4.1) พบว่า หญ้าแฝก มีการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพมากกว่าไผ่ป่า ในทุกช่วงเวลาของการเก็บตัวอย่าง โดยพบว่า หญ้าแฝกวันที่เริ่มต้น (0 วัน) มีมวลชีวภาพเท่ากับ 3.09 กรัม และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) หญ้าแฝก มีมวลชีวภาพเท่ากับ 855.21 กรัม ส่วนไผ่ป่า พบว่า วันที่เริ่มต้น (0 วัน) มีมวลชีวภาพเท่ากับ 21.54 กรัม และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) หญ้าแฝก มีมวลชีวภาพเท่ากับ 634.37 กรัม ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า การเจริญเติบโตในแต่ละช่วงระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง คือ 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน ของพืชทั้งสองชนิดค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P \leq 0.05$) ดังตารางที่ 4.3 และจากผลการทดลองดังกล่าว มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Ma และคณะ (2015) ที่ทำการศึกษาการบำบัดดินที่มีการปนเปื้อนสังกะสี แมงกานีส ทองแดง แคดเมียม โครเมียม และสารหนู โดยใช้หญ้าเนเปียร์ ผลการศึกษาพบว่า การเจริญเติบโต ความทนทานของพืชที่ปลูกในบ่อเก็บกากโลหกรรมดังกล่าวมีลักษณะแคระแกรน

2) พืชใบเลี้ยงเดี่ยว (ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง Ex-situ)

สำหรับการเจริญเติบโตของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่ทำการปลูกในโรงเรือน (Ex-situ) ประกอบด้วย 6 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) หญ้าแฝก (ควบคุม) 2) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี 3) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 4) ไผ่ป่า (ควบคุม) 5) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี 6) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ (ดังรูปที่ 4.2) พบว่า พืชทั้ง 6 ชุดการทดลอง มีการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพซึ่งค่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P \leq 0.05$) ตามช่วงระยะเวลาในการเก็บตัวอย่าง โดยพบว่า วันที่เริ่มต้น (0 วัน) พืชในแต่ละชุดการทดลองมีมวลชีวภาพเท่ากับ 3.00, 3.09, 3.01, 2.39, 2.43 และ 2.39 กรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีมวลชีวภาพเท่ากับ 341.22, 643.32, 636.74, 337.30, 544.11 และ 570.07 กรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง โดยหญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพมากที่สุดในทุกช่วงเวลาของการเก็บตัวอย่าง โดยวันที่เริ่มต้น (0 วัน) มีมวลชีวภาพเท่ากับ 3.09 กรัม และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีมวลชีวภาพเท่ากับ 643.32 กรัม นอกจากนี้ยังพบว่า ไผ่ป่า (ควบคุม) มีอัตราการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่นๆ กล่าวคือ วันที่เริ่มต้นของการทดลอง (0 วัน) มีมวลชีวภาพเท่ากับ 2.39 กรัม และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีมวลชีวภาพเท่ากับ 337.30 กรัม ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าว มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Chen และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาระดับธาตุฟอสฟอรัสที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยทำการทดลองในข้าวสาลี และมีการเติม

ปุ๋ยฟอสเฟต 5 ระดับ ได้แก่ 0, 50, 100, 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเติมแคดเมียมคลอไรด์ ($CdCl_2$ 2.5 H_2O) และเลด (II) ไนเตรท [$Pb(NO_3)_2$] ในระดับต่าง ๆ กัน จากการทดลอง พบว่าปุ๋ยฟอตเฟตที่เพิ่มขึ้นสามารถช่วยส่งเสริมให้น้ำหนักแห้งของข้าวสาลีเพิ่มขึ้นเช่นกัน



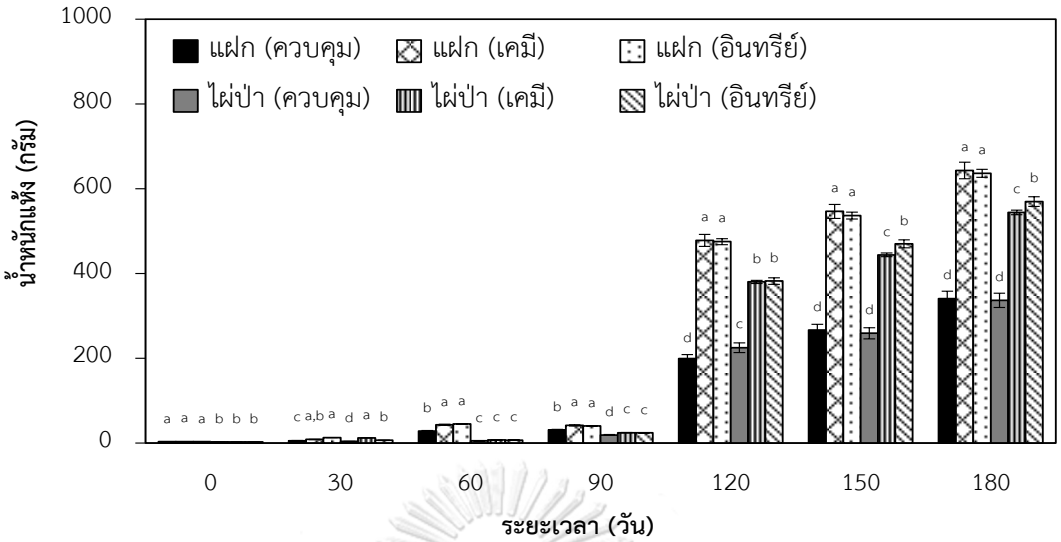
รูปที่ 4.2 น้ำหนักแห้งของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

ตารางที่ 4.3 มวลชีวภาพของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

ระยะเวลา	มวลชีวภาพของพืชทดลอง (กรัม)			
(วัน)	ชุดควบคุม	หญ้าแฝก	ชุดควบคุม	ไผ่ป่า
0	3.02^{b} ± 0.00	3.09^{b} ± 0.00	20.60^{a} ± 0.00	21.54^{a} ± 0.00
30	23.50^{b} ± 1.04	25.05^{b} ± 2.00	26.70^{b} ± 1.00	34.41^{a} ± 2.75
60	120.00^{b} ± 1.00	133.26^{a} ± 0.64	60.00^{c} ± 2.09	143.71^{a} ± 4.18
90	170.00^{c} ± 2.30	256.22^{a} ± 0.77	98.00^{d} ± 1.50	194.82^{b} ± 0.97
120	259.00^{c} ± 0.97	479.78^{a} ± 22.64	158.90^{d} ± 3.04	379.99^{b} ± 7.30
150	360.00^{c} ± 0.53	669.82^{a} ± 7.65	289.00^{d} ± 1.86	557.62^{b} ± 7.04
180	520.02^{c} ± 2.06	855.21^{a} ± 1.01	420.00^{d} ± 0.99	634.37^{b} ± 1.17

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.3 น้ำหนักแห้งของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ตารางที่ 4.4 มวลชีวภาพของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

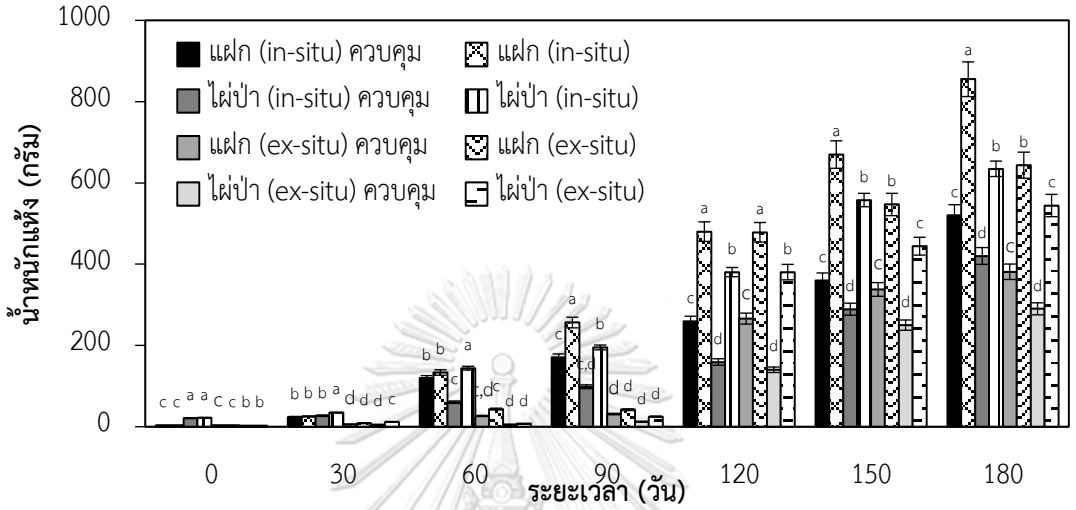
ระยะเวลา (วัน)	มวลชีวภาพของพืชทดลอง (กรัม)											
	ชุดควบคุม		หญ้าแฝก-เคมี		หญ้าแฝก-อินทรีย์		ชุดควบคุม		ไผ่ป่า-เคมี		ไผ่ป่า-อินทรีย์	
0	3.00^{a}	±0.0	3.09^{a}	±0.0	3.01^{a}	±0.0	2.39^{b}	±0.4	2.43^{b}	±0.1	2.39^{b}	±0.6
30	5.40^{c}	±0.3	8.43^{a,b}	±2.4	12.70^{a}	±3.2	3.90^{d}	±1.0	11.83^{a}	±5.0	6.34^{b}	±1.2
60	28.00^{b}	±1.0	42.91^{a}	± 5.4	44.95^{a}	±5.3	5.10^{c}	±1.8	7.02^{c}	±0.8	6.98^{c}	±0.0
90	31.16^{b}	±2.0	41.68^{a}	± 0.8	40.08^{a}	±1.0	18.90^{d}	±2.6	24.41^{c}	±0.9	23.83^{c}	±1.5
120	199.9^{d}	±2.0	478.24^{a}	±15.5	475.36^{a}	±2.3	225.22^{c}	±1.0	389.30^{b}	±7.7	382.3^{b}	±3.7
150	267.10^{d}	±2.6	546.81^{a}	± 8.6	536.74^{a}	±3.2	259.15^{d}	±0.9	444.11^{c}	±0.9	470.07^{b}	±2.2
180	341.22^{d}	±1.1	643.32^{a}	± 2.3	636.74^{a}	±3.2	337.30^{d}	±0.0	544.11^{c}	±0.9	570.07^{b}	±2.0

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

3) เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว

เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของพืชทดลองในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) กับชุดทดลองในโรงเรือน (Ex-situ) ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี (ดังรูปที่ 4.3) พบว่า หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมีที่ปลูกในแปลงทดลอง (In-situ) มีอัตราการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ และมีค่าสูงกว่าหญ้าแฝกที่ปลูกในโรงเรือน (Ex-situ) ด้วยเช่นกัน ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ สมฤทัย ตันเจริญ (2545) ที่ทำการศึกษาอิทธิพลของการใส่ฟางข้าวร่วมกับปุ๋ยเคมีต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของดิน ผลผลิต และการดูดใช้

ธาตุอาหารของข้าวที่ปลูกในชุดดินลพบุรีในสภาพน้ำขัง ซึ่งพบว่า ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี1 ที่ไม่ได้รับการใส่ปุ๋ยเคมี และฟางข้าวมีน้ำหนักแห้งต่ำกว่าข้าวที่ได้รับการใส่ปุ๋ยเคมีและฟางข้าว



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบน้ำหนักแห้งของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือน (Ex-situ)

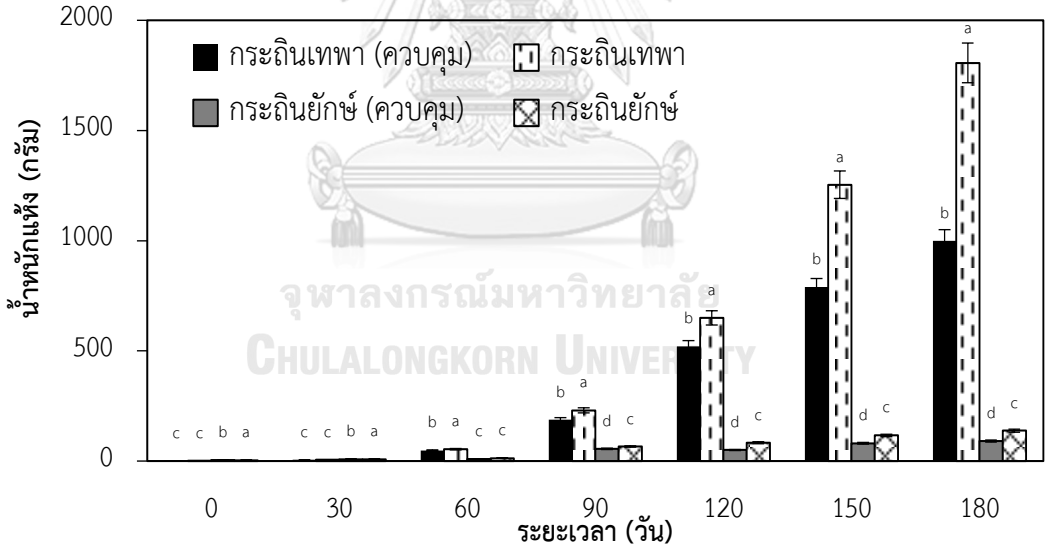
4) พืชใบเลี้ยงคู่ (ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง In-situ)

การเจริญเติบโตของพืชใบเลี้ยงคู่ที่ทำการปลูกในแปลงทดลองชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ประกอบด้วย กระถินเทพา และกระถินยักษ์ (ดังรูปที่ 4.4) พบว่า กระถินเทพามีการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพมากกว่ากระถินยักษ์ในทุกช่วงเวลาของการเก็บตัวอย่าง กล่าวคือ วันที่เริ่มต้นการทดลอง (0 วัน) พบว่า กระถินเทพาและกระถินยักษ์ มีมวลชีวภาพเท่ากับ 0.59 และ 3.48 กรัม ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) พบว่า กระถินเทพาและกระถินยักษ์มีมวลชีวภาพเท่ากับ 1,807.03 และ 138.30 กรัม ตามลำดับ และยังพบว่า การเจริญเติบโตในแต่ละช่วงระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง คือ 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน ของพืชทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P \leq 0.05$) ดังตารางที่ 4.6

5) พืชใบเลี้ยงคู่ (ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง Ex-situ)

จากการศึกษาการเจริญเติบโตของพืชใบเลี้ยงคู่ที่ทำการปลูกในโรงเรือน (Ex-situ) ประกอบด้วย 6 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) กระถินเทพา (ควบคุม) 2) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี 3) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 4) กระถินยักษ์ (ควบคุม) 5) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี 6) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ (ดังรูปที่ 4.5) พบว่า พืชทั้ง 6 ชุดการทดลองมีการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพซึ่งค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P \leq 0.05$) ตามช่วงระยะเวลาของการ

เก็บตัวอย่าง โดยพบว่า วันที่เริ่มต้น (0 วัน) พืชในแต่ละชุดการทดลองมีมวลชีวภาพเท่ากับ 0.53, 0.54, 0.54, 3.41, 3.44 และ 3.45 กรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (ครบ 180 วัน) มีมวลชีวภาพเท่ากับ 811.99, 989.17, 690.30, 659.20, 746.47 และ 727.26 กรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง โดยพบว่า กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพมากที่สุดในทุกชุดการทดลอง และในทุกช่วงเวลาของการเก็บตัวอย่าง กล่าวคือ วันที่เริ่มต้นการทดลอง (0 วัน) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีมวลชีวภาพเท่ากับ 0.54 กรัม เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีมวลชีวภาพเท่ากับ 989.17 กรัม สำหรับกระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ มีอัตราการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่นๆ กล่าวคือ วันที่เริ่มต้นของการทดลอง (0 วัน) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ มีมวลชีวภาพเท่ากับ 3.45 กรัม และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีมวลชีวภาพเท่ากับ 727.26 กรัม ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าว มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Amkha และคณะ (2006) พบว่า เมื่อให้ปุ๋ยในระดับไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น (156-625 กิโลกรัมต่อเฮกตาร์) ทำให้การเจริญเติบโตของคะน้าทางด้านความสูง พื้นที่ใบ น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกระยะการเจริญเติบโต



รูปที่ 4.5 น้ำหนักแห้งของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบมวลชีวภาพของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ระยะเวลา (วัน)	มวลชีวภาพของพืชทดลอง (กรัม)							
	ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง In-situ				ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง Ex-situ			
	ชุดควบคุม	หญ้าแฝก	ชุดควบคุม	ไผ่ป่า	ชุดควบคุม	หญ้าแฝก-เคมี	ชุดควบคุม	ไผ่ป่า-เคมี
0	3.02^{c} ± 0.00	3.09 ^{c} ± 0.00	20.60^{a} ± 0.00	21.54 ^{a} ± 0.00	3.00^{c} ± 0.00	3.09^{c} ± 0.00	2.39^{b} ± 0.40	2.43^{b} ± 0.12
30	23.50^{b} ± 1.04	25.05^{b} ± 2.00	26.70^{b} ± 1.00	34.41^{a} ± 2.75	5.40^{d} ± 0.35	8.43^{d} ± 2.45	3.90^{d} ± 1.05	11.83^{c} ± 5.02
60	120.00^{b} ± 1.00	133.26^{b} ± 0.64	60.00^{c} ± 2.09	143.71^{a} ± 4.18	28.00^{c,d} ± 1.00	42.91^{c} ± 5.39	5.10^{d} ± 1.80	7.02^{d} ± 0.75
90	170.00^{c} ± 2.30	256.22^{a} ± 0.77	98.00^{c,d} ± 1.50	194.82^{b} ± 0.97	31.16^{d} ± 1.96	41.68^{d} ± 0.76	18.90^{d} ± 2.64	24.41^{d} ± 0.93
120	259.00^{c} ± 0.97	479.78^{a} ± 22.64	158.90^{d} ± 3.04	379.99^{b} ± 7.30	199.90^{c} ± 2.00	478.24^{a} ± 15.50	225.22^{d} ± 1.00	389.30^{b} ± 7.73
150	360.00^{c} ± 0.53	699.82^{a} ± 7.65	289.00^{d} ± 1.86	557.62 ^{b} ± 7.04	267.00^{c} ± 0.10	546.81^{b} ± 8.56	259.15^{d} ± 0.90	444.11^{c} ± 0.92
180	520.02^{c} ± 2.06	855.21^{a} ± 1.01	420.11^{d} ± 0.99	634.37^{b} ± 1.17	341.22^{c} ± 1.07	643.32^{b} ± 2.34	337.30^{d} ± 0.00	544.11^{c} ± 0.92

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

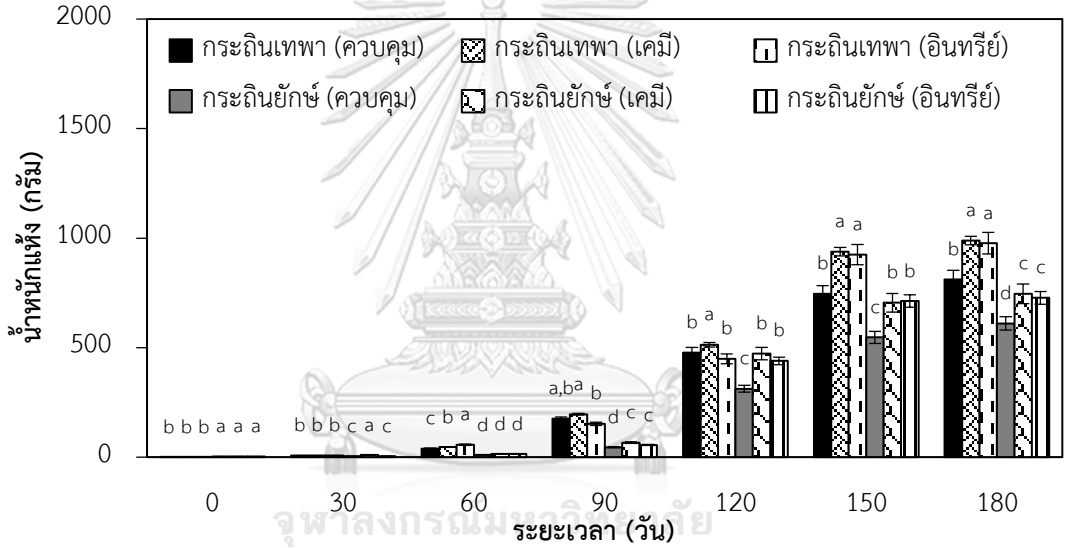
ตารางที่ 4.6 มวลชีวภาพของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

ระยะเวลา (วัน)	มวลชีวภาพของพืชทดลอง (กรัม)							
	ชุดควบคุม		กระถินเทพา		ชุดควบคุม		ชุดควบคุม	
0	0.59^{c}	± 0.05	0.59^{c}	± 0.05	3.55^{b}	± 0.00	3.48^{a}	± 0.11
30	6.01^{c}	± 0.00	6.27^{c}	± 1.12	7.80^{b}	± 0.00	8.09^{a}	± 1.10
60	48.20^{b}	± 0.00	53.71^{a}	± 5.29	8.73^{c}	± 0.00	12.66^{c}	± 2.37
90	188.00^{b}	± 0.00	229.89^{a}	± 5.11	55.34^{d}	± 0.00	65.43^{c}	± 8.56
120	521.01^{b}	± 0.00	649.47^{a}	± 1.41	50.21^{d}	± 0.00	83.00^{c}	± 5.16
150	789.55^{b}	± 0.00	1,254^{a}	± 9.72	80.55^{d}	± 0.00	116.33^{c}	± 16.66
180	999.99^{b}	± 0.00	1,807^{a}	± 3.35	90.77^{d}	± 0.00	138.30^{c}	± 2.38

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

6) เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของพืชใบเลี้ยงคู่

อัตราการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของพืชใบเลี้ยงคู่ในชุดการทดลองในแปลงทดลอง (In-situ) กับชุดการทดลองในโรงเรือน (Ex-situ) ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี (ดังรูปที่ 4.6) พบว่า กระถินเทพาที่ปลูกในแปลงทดลอง (In-situ) มีอัตราการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งสูงกว่าชุดทดลองอื่นๆ และมีค่าสูงกว่าพืชที่ปลูกในโรงเรือน (Ex-situ) ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ภารินี วนาพรรณ์ (2553) พบว่า อ้อยมีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวในเดือนที่ 2 ถึง 8 ในทุกชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมปุ๋ยเคมี พบว่า มีน้ำหนักแห้งน้อยกว่าชุดการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยเคมีและค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และเมื่อมีอัตราการเติมปุ๋ยเคมีเพิ่มขึ้นทำให้น้ำหนักแห้งของอ้อยเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.6 น้ำหนักแห้งของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

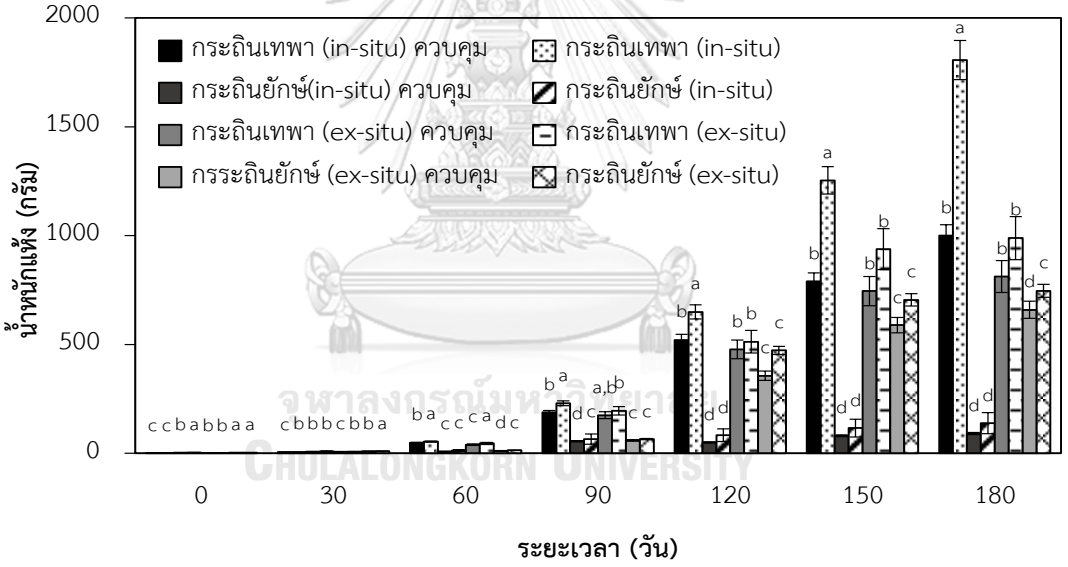
4.5.2 ความสูง (Hight)

การศึกษาการเจริญเติบโตด้านความสูงของพืชทดลอง ซึ่งได้มีการเก็บข้อมูลด้านความสูงของพืชทดลองในทุกๆ สัปดาห์ ตั้งแต่เริ่มทำการทดลอง (0 วัน) จนถึงสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) โดยมีการวัดความสูงจากผิวดินขึ้นไปจนถึงปลายใบที่สูงที่สุดซึ่งแบ่งเป็น 2 ชุดการทดลอง คือ 1) การทดลองในแปลงทดลอง (In-situ) และ 2) การทดลองในโรงเรือน (Ex-situ) โดยทำในลักษณะเช่นเดียวกันในทุกชนิดของพืชทดลอง ได้แก่ กระถินเทพา กระถินยักษ์ หญ้าแฝก และไผ่ป่า ซึ่งผลการเจริญเติบโตของพืชทดลองด้านความสูง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 โดยสามารถแสดงรายละเอียดของข้อมูลสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 4.7 มวลชีวภาพของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ระยะเวลา (วัน)	มวลชีวภาพของพืชทดลอง (กรัม)											
	ชุดควบคุม		กระถินเทพา -เคมี		กระถินเทพา -อินทรีย์		ชุดควบคุม		กระถินยักษ์ -เคมี		กระถินยักษ์ -อินทรีย์	
0	0.53^{b}	±0.00	0.55^{b}	±0.01	0.54^{b}	±0.01	3.40^{a}	±0.00	3.44^{a}	±0.04	3.46^{a}	±0.04
30	7.10^{b}	±0.00	7.32^{b}	±0.79	7.61^{b}	±0.40	3.90^{c}	±0.00	10.24^{a}	±1.84	4.31^{c}	±0.31
60	39.44^{c}	±0.00	45.56^{b}	±5.32	56.81^{a}	±5.07	10.33^{d}	±0.00	14.22^{d}	±0.89	14.71^{d}	±0.89
90	175.34^{a}	±0.00	195.66^{a}	±5.16	152.51^{b}	±0.66	45.20^{d}	±0.00	65.83^{c}	±5.02	55.82^{c}	±5.94
120	477.40^{b}	±0.00	512.80^{a}	±2.54	449.47^{b}	±1.41	312.22^{c}	±0.00	472.80^{b}	±9.01	439.47^{b}	±1.11
150	754.33^{b}	±0.00	938.13^{a}	±4.70	924.80^{a}	±2.94	546.99^{c}	±0.00	704.08^{b}	±8.38	712.40^{b}	±0.31
180	811.99^{b}	±0.00	989.17^{a}	±1.08	976.79^{a}	±7.35	610.66^{d}	±0.00	746.47^{c}	±0.48	727.26^{c}	±7.01

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบน้ำหนักแห้งของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

1) ความสูงของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตด้านความสูงของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) รูปที่ 4.7 ก) พบว่า พืชทดลอง ได้แก่ หญ้าแฝกและไผ่ป่ามีความสูงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 2-24 สัปดาห์ โดยที่ระยะ 24 สัปดาห์ของการทดลอง หญ้าแฝกมีการเจริญเติบโตด้านความสูงมากที่สุด รองลงมาคือ หญ้าแฝก (ควบคุม) > ไผ่ป่า > ไผ่ป่า (ควบคุม) มีค่า

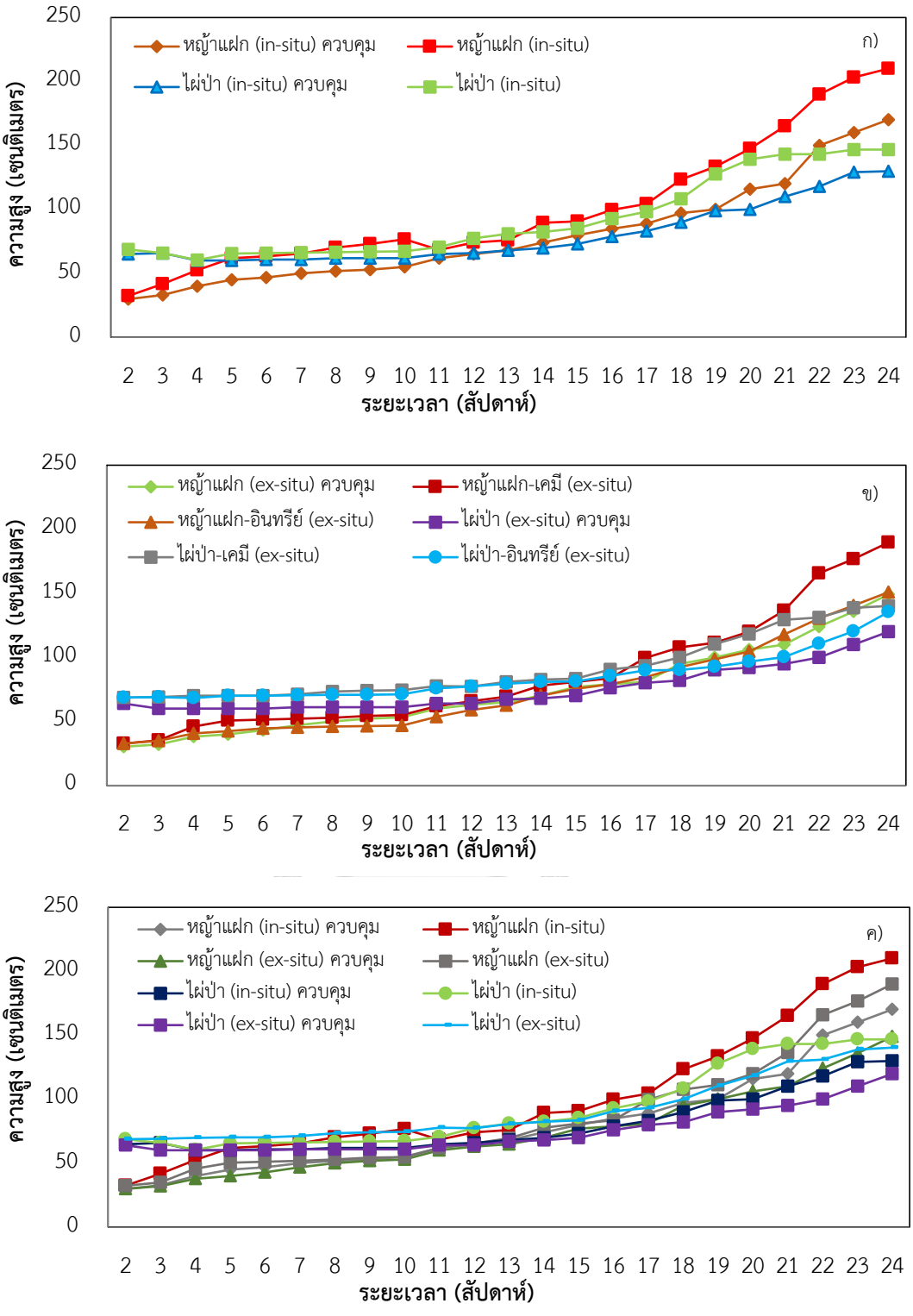
เท่ากับ 210.00, 170.00, 146.67 และ 130.00 เซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ดังรูปที่ 4.7 ข) พบว่า หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีอัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงมากที่สุด รองลงมาคือ แฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > หญ้าแฝก (ควบคุม) > ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี > ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > ไผ่ป่า (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 189.88, 150.77, 149.00, 140.22, 135.56 และ 79.00 เซนติเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบความสูงของพืชทดลองในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ดังรูปที่ 4.7 ค) พบว่า ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) พืชทดลองมีอัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงที่มากกว่าชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ อัจฉรา จิตตลดากร และคณะ (2555) ที่ได้ทำการศึกษาผลของการใช้ปุ๋ยมูลวัว ปุ๋ยหมัก และปุ๋ยเคมีต่อการผลิตผักบุ้งจีน และทำการวัดความสูงของลำต้น ความยาวใบ ความกว้างใบ พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว และการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับปุ๋ยหมักสามารถทำให้พืชมีอัตราการเจริญเติบได้สูงกว่าการไม่ใส่ปุ๋ยเคมี

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบมวลชีวภาพของพืชใบเลี้ยงคู่ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

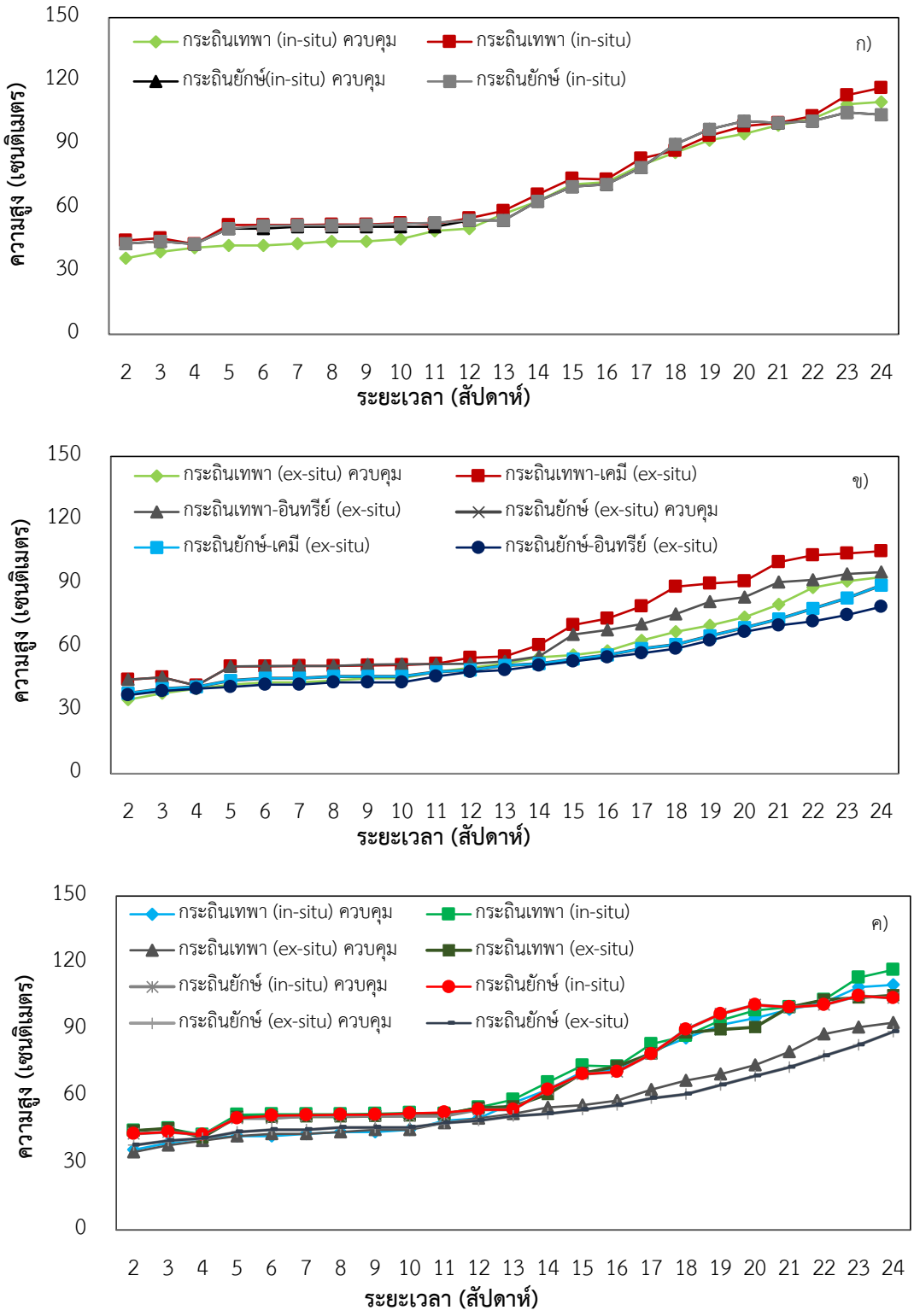
ระยะเวลา (วัน)	มวลชีวภาพของพืชทดลอง (กรัม)							
	ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง In-situ				ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง Ex-situ			
	ชุดควบคุม	กระถินเทพา	ชุดควบคุม	กระถินยักษ์	ชุดควบคุม	กระถินเทพา-เคมี	ชุดควบคุม	กระถินยักษ์-เคมี
0	0.59^{c} ± 0.00	0.59^{b} ± 0.05	3.55^{b} ± 0.00	3.48^{a} ± 0.11	0.53^{b} ± 0.00	0.55^{b} ± 0.01	3.41^{a} ± 0.00	3.44^{a} ± 0.04
30	6.01^{c} ± 0.00	6.27^{b} ± 1.12	7.80^{b} ± 0.00	$8.09^{a,b}$ ± 1.01	7.10^{c} ± 0.00	7.32^{b} ± 0.79	9.21^{b} ± 0.00	11.83^{a} ± 5.02
60	48.20^{b} ± 0.00	53.71^{a} ± 5.29	8.73^{c} ± 0.00	12.66^{c} ± 2.37	39.44^{c} ± 0.00	45.56^{a} ± 5.32	11.23^{d} ± 0.00	14.22^{c} ± 0.89
90	188.00^{b} ± 0.00	229.89^{a} ± 5.11	55.34^{d} ± 0.00	65.34^{c} ± 5.66	$175.34^{a,b}$ ± 0.00	195.66^{b} ± 5.16	59.20^{c} ± 0.00	65.83^{c} ± 5.02
120	521.01^{b} ± 0.00	649.47^{a} ± 4.14	50.21^{d} ± 0.00	83.00^{d} ± 5.16	477.40^{b} ± 0.00	512.80^{b} ± 2.54	356.3^{c} ± 0.00	472.80^{c} ± 4.91
150	789.55^{b} ± 0.00	$1,254^{a}$ ± 7.72	80.55^{d} ± 0.00	116.33^{d} ± 6.66	754.33^{b} ± 0.00	938.13^{b} ± 4.07	589.09^{c} ± 0.00	704.08^{c} ± 3.68
180	999.99^{b} ± 0.00	$1,807^{a}$ ± 3.35	90.77^{d} ± 0.00	138.30^{d} ± 2.38	811.99^{b} ± 0.00	989.17^{b} ± 1.08	659.20^{c} ± 0.00	746.47^{c} ± 0.48

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.8 ความสูงของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ก) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ข) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) และ ค) เปรียบเทียบความสูงของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)



รูปที่ 4.9 ความสูงของพืชใบเลี้ยงคู่ ก) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ข) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) และ ค) เปรียบเทียบความสูงของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

2) ความสูงของพืชใบเลี้ยงคู่

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตด้านความสูงของพืชใบเลี้ยงคู่ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ดังรูปที่ 4.8 ก) พบว่า พืชทดลองมีความสูงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 2-24 สัปดาห์ โดยที่ระยะ 24 สัปดาห์ของการทดลอง กระถินเทพามีอัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงมากที่สุด รองลงมาคือ กระถินเทพา (ควบคุม) > กระถินยักษ์ > กระถินยักษ์ (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 116.67, 110.00, 104.50 และ 104.00 เซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ดังรูปที่ 4.8 ข) พบว่า กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีอัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงที่สุด รองลงมาคือ กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินเทพา (ควบคุม) > กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี > กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินยักษ์ (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 105.33, 95.23, 93.00, 89.00, 80.00 และ 79.00 เซนติเมตร ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบความสูงของพืชทดลองในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ดังรูปที่ 4.8 ค) พบว่า ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) มีอัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงที่มากกว่าชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) เช่นเดียวกับชุดการทดลองที่ปลูกพืชใบเลี้ยงเดี่ยว

4.5.3 การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (RGR)

การเจริญเติบโตสัมพันธ์ของพืชทดลอง โดยได้ทำการเก็บตัวอย่างพืชในวันที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง คือ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ของพืช 2 กลุ่ม คือ พืชใบเลี้ยงเดี่ยว และพืชใบเลี้ยงคู่ และได้ทำการคำนวณจากการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพต่อระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสรุปผลของอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ได้ดังนี้

1) พืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

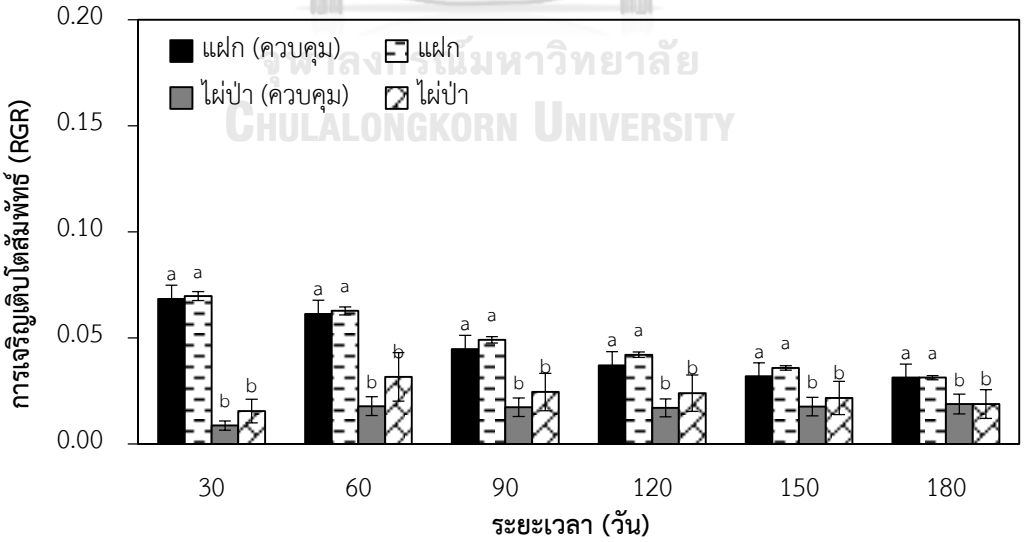
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากการศึกษาการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ที่ทำการปลูกในแปลงทดลอง (In-situ) ประกอบด้วย หญ้าแฝก และไผ่ป่า (ดังรูปที่ 4.9) พบว่า พืชทดลองมีค่าการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น โดยหญ้าแฝกมีการลดลงของอัตราการเจริญเติบโตสัมพันธ์อย่างเห็นได้ชัดเจน กล่าวคือ ในช่วง 30 วันแรกของการเจริญเติบโตมีค่าสัมพัทธ์เท่ากับ 0.07 และเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นทุกๆ 30 วัน พบว่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์มีการลดลงอย่างต่อเนื่อง ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) พบว่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดลงเหลือ 0.03 ดังตารางที่ 4.9 ซึ่งผลจากการศึกษาในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Shri และคณะ (2009) ที่มีการรายงานผลการทดลองว่าสารหนูสามารถทำให้ต้นข้าว (*Oryza sativa*) มีเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดลดลง รวมทั้งความยาวราก ลำต้น และมวลชีวภาพลดลง นอกจากนี้แมงกานีสซึ่งจัดเป็นธาตุอาหารเสริมของพืช

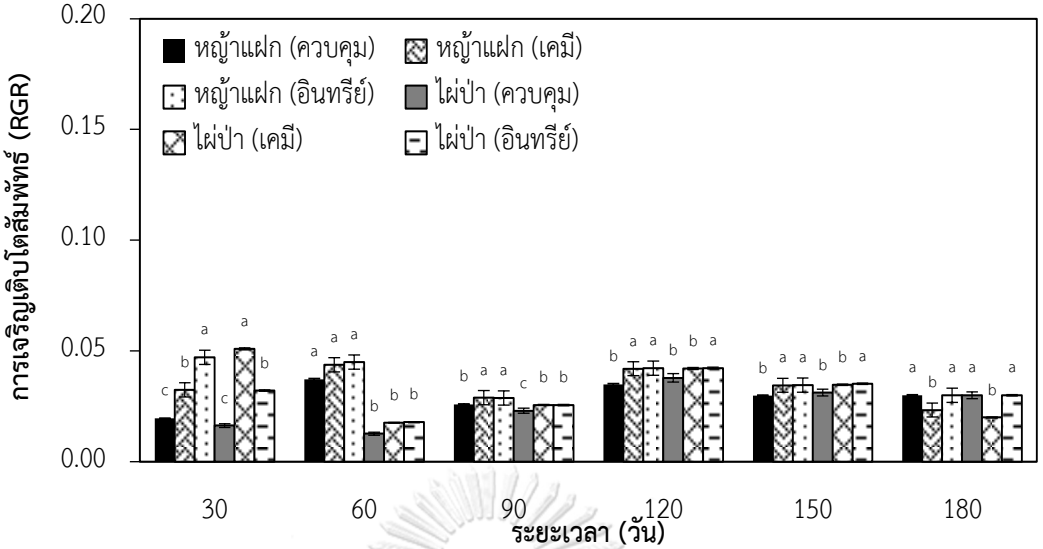
(Micronutrient Elements) ที่พืชต้องการในปริมาณน้อยเท่านั้น หากแต่ถ้าพืชได้รับในปริมาณมากเกินไปจะแสดงความเป็นพิษ ได้แก่ ใบมีสีเหลืองหรือสีขาวซีดบริเวณระหว่างเส้นใบ ใบแก่มีรอยด่างเป็นจุด ขอบใบ และเส้นใบมีสีขาวซีด ใบเริ่มมีสีน้ำตาลและร่วงหล่นในที่สุด

2) พืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

สำหรับอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ประกอบด้วย 6 ชุดการทดลอง (ดังรูปที่ 4.10) พบว่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าแฝกชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมี และหญ้าแฝกชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ โดยค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กล่าวคือ ในช่วง 30 วันแรกของการเจริญเติบโตมีค่าสัมพัทธ์เท่ากับ 0.03 และ 0.05 ตามลำดับ ของชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ย และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) พบว่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดลงเหลือ 0.02 และ 0.03 ตามลำดับ ของชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ย โดยอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืช พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 30-60 วัน และลดลงในช่วง 90 วัน หลัง จากนั้นมีค่าลดลงไปจนสิ้นสุดการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากในช่วง 30-60 วันแรกนั้นพืชมีการเจริญเติบโต และมีการดูดดึงโลหะหนักเข้าสู่ต้นพืชได้ตามปกติ หากแต่เมื่อเข้าสู่วันที่ 90 ของการทดลอง จะพบว่าพืชได้รับโลหะหนักในปริมาณมากเกินไปจนเกิดการชะงักและชะลอการเจริญเติบโต ตลอดจนมีการแสดงความเป็นพิษด้วย และภายหลังจากนั้นเมื่อพืชเกิดการปรับตัวต่อความเป็นพิษของโลหะหนักได้ จึงทำให้อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น และค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนวันสิ้นสุดการทดลอง ดังตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.10 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)



รูปที่ 4.11 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ตารางที่ 4.9 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

ระยะเวลา (วัน)	อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์			
	ชุดควบคุม	หญ้าแฝก	ชุดควบคุม	ไผ่ป่า
30	$0.07^{a} \pm 0.04$	$0.07^{a} \pm 0.10$	$0.01^{b} \pm 0.07$	$0.02^{b} \pm 0.04$
60	$0.06^{a} \pm 0.09$	$0.06^{a} \pm 0.07$	$0.02^{b} \pm 0.02$	$0.03^{b} \pm 0.06$
90	$0.04^{a} \pm 0.03$	$0.05^{a} \pm 0.07$	$0.02^{b} \pm 0.09$	$0.02^{b} \pm 0.10$
120	$0.03^{a} \pm 0.05$	$0.04^{a} \pm 0.09$	$0.01^{b} \pm 0.08$	$0.02^{b} \pm 0.10$
150	$0.03^{a} \pm 0.01$	$0.04^{a} \pm 0.03$	$0.02^{b} \pm 0.08$	$0.02^{b} \pm 0.01$
180	$0.03^{a} \pm 0.08$	$0.03^{a} \pm 0.01$	$0.02^{b} \pm 0.05$	$0.02^{b} \pm 0.08$

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

3) เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว

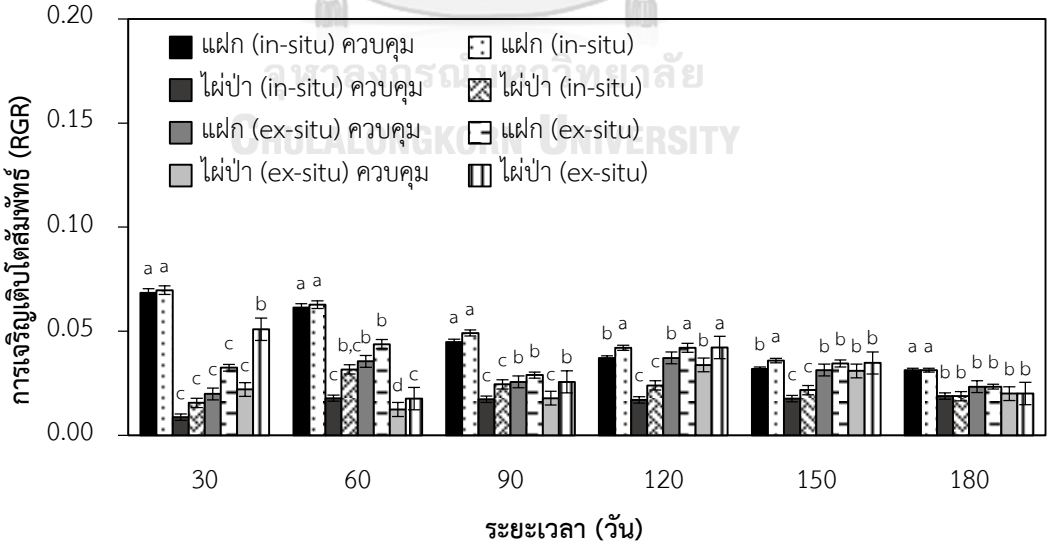
เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชทดลองในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) กับชุดทดลองในโรงเรือน (Ex-situ) ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี (ดังรูปที่ 4.11) พบว่า หญ้าแฝกชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) มีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์สูงกว่าชุดทดลองอื่น ๆ และมีค่าสูงกว่าหญ้าแฝกชุดทดลองในโรงเรือน (Ex-situ) ด้วยเช่นกัน และเมื่อเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นจะพบว่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากพืชทดลองได้รับปัจจัยจากการสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ โดยพืชสามารถดูดดึงสารโลหะ

หนักเข้าสู่ต้นพืชได้ และเมื่อระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์มีการสะสมในพืชทดลองเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลทำให้พืชชะงักหรือชะลอการเจริญเติบโตได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ สุภาพร พงศ์ธรพฤกษ์ (2545) ทำการศึกษาวิจัยและพบว่า แคดเมียมในดินที่ระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นทำให้น้ำหนักของผักกาดเขียวลดลงตามระดับความเข้มข้น และระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อน้ำหนัก และอัตราการเจริญเติบโตของผักกาดเขียว

ตารางที่ 4.10 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ระยะเวลา (วัน)	อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์					
	ชุดควบคุม	หญ้าแฝก-เคมี	หญ้าแฝก-อินทรีย์	ชุดควบคุม	ไผ่ป่า-เคมี	ไผ่ป่า-อินทรีย์
30	$0.02^{c} \pm 0.03$	$0.03^{b} \pm 0.01$	$0.05^{a} \pm 0.01$	$0.02^{c} \pm 0.02$	$0.05^{a} \pm 0.01$	$0.03^{b} \pm 0.01$
60	$0.04^{a} \pm 0.07$	$0.04^{a} \pm 0.09$	$0.04^{a} \pm 0.07$	$0.01^{c} \pm 0.09$	$0.02^{b} \pm 0.07$	$0.02^{b} \pm 0.05$
90	$0.03^{b} \pm 0.02$	$0.03^{b} \pm 0.08$	$0.048^{a} \pm 0.01$	$0.02^{c} \pm 0.03$	$0.03^{b} \pm 0.04$	$0.05^{a} \pm 0.002$
120	$0.03^{b} \pm 0.02$	$0.04^{a} \pm 0.08$	$0.03^{b} \pm 0.05$	$0.03^{b} \pm 0.05$	$0.02^{c} \pm 0.03$	$0.03^{b} \pm 0.07$
150	$0.03^{b} \pm 0.01$	$0.04^{a} \pm 0.02$	$0.03^{b} \pm 0.01$	$0.03^{b} \pm 0.05$	$0.02^{c} \pm 0.09$	$0.04^{a} \pm 0.01$
180	$0.03^{a} \pm 0.05$	$0.02^{a} \pm 0.05$	$0.03^{a} \pm 0.03$	$0.03^{a} \pm 0.08$	$0.02^{b} \pm 0.05$	$0.03^{a} \pm 0.02$

หมายเหตุ:ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือน (Ex-situ)

ตารางที่ 4.11 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ระยะเวลา (วัน)	อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์							
	ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง In-situ				ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง Ex-situ			
	ชุดควบคุม	หญ้าแฝก	ชุดควบคุม	ไผ่ป่า	ชุดควบคุม	หญ้าแฝก-เคมี	ชุดควบคุม	ไผ่ป่า-เคมี
30	0.07^{a} ± 0.08	0.07^{a} ± 0.03	0.01^{b} ± 0.02	0.02^{c} ± 0.02	0.02^{c} ± 0.09	0.03^{c} ± 0.01	0.02^{c} ± 0.04	0.05^{b} ± 0.01
60	0.06^{a} ± 0.06	0.06^{a} ± 0.07	0.02^{c} ± 0.07	$0.03^{b,c}$ ± 0.03	0.04^{b} ± 0.08	0.04^{b} ± 0.07	0.01^{d} ± 0.06	0.02^{c} ± 0.02
90	0.04^{a} ± 0.08	0.05^{a} ± 0.09	0.02^{c} ± 0.07	0.02^{c} ± 0.07	0.03^{b} ± 0.06	0.03^{b} ± 0.03	0.02^{c} ± 0.03	0.03^{b} ± 0.01
120	0.03^{b} ± 0.02	0.04^{a} ± 0.01	0.01^{c} ± 0.01	0.02^{c} ± 0.05	0.03^{b} ± 0.08	0.04^{a} ± 0.05	0.03^{b} ± 0.09	0.02^{c} ± 0.02
150	0.03^{b} ± 0.09	0.04^{a} ± 0.01	0.02^{c} ± 0.08	0.02^{c} ± 0.01	0.03^{b} ± 0.01	0.04^{a} ± 0.03	0.03^{b} ± 0.03	0.02^{c} ± 0.02
180	0.03^{a} ± 0.08	0.03^{a} ± 0.01	0.02^{b} ± 0.06	0.02^{b} ± 0.06	0.03^{b} ± 0.07	0.02^{a} ± 0.08	0.02^{b} ± 0.01	0.02^{b} ± 0.01

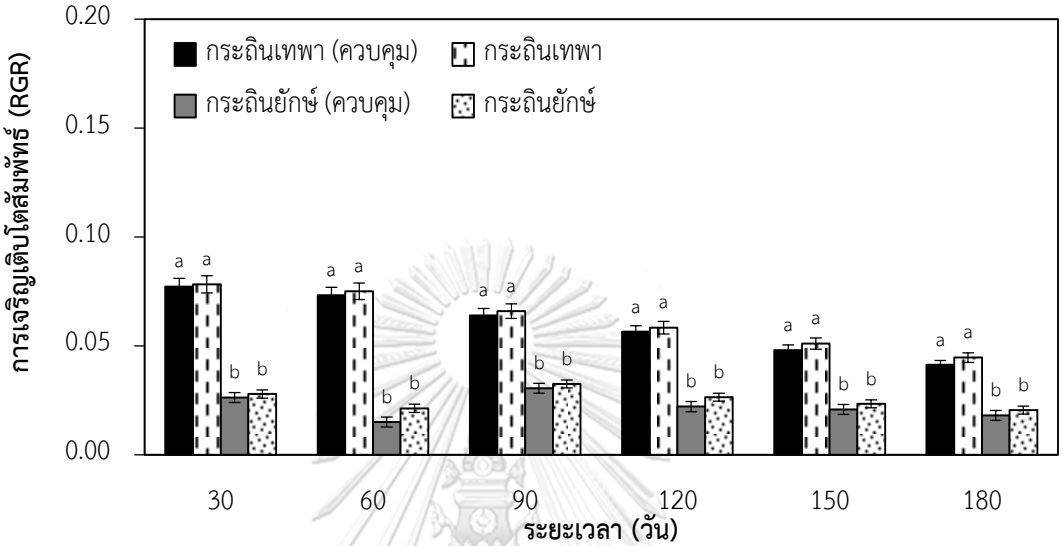
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4) พืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

จากการศึกษาการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชใบเลี้ยงคู่ ที่ทำการปลูกในแปลงทดลอง ประกอบด้วย กระถินเทพา และกระถินยักษ์ (ดังรูปที่ 4.12) พบว่า พืชทดลองมีค่าการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดลงเมื่อเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น และเป็นที่สังเกตว่าที่ระยะ 90 วัน ของการทดลอง ดังตารางที่ 4.12 พบว่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของกระถินยักษ์มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่ระยะ 90 วัน กระถินยักษ์มีการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในส่วนลำต้นได้ลดลง ทำให้มีการเจริญเติบโตได้ดีขึ้น หรืออาจกล่าวสรุปได้ว่า ปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ที่เพิ่มขึ้นสามารถส่งผลทำให้การเจริญเติบโตสัมพัทธ์มีค่าลดลง และเมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ที่ระยะ 180 วัน พบว่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ระหว่างพืชทดลองทั้ง 2 ชนิดนั้นมีค่าลดลง โดยค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ สุรัตนา เสนาะ (2548) ทำการวิจัย และพบว่า ข้าวที่ปลูกใน

ดินที่มีปริมาณแคดเมียมมากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ข้าวยังคงสามารถให้ผลผลิตอยู่ หากแต่มีแนวโน้มของการให้ผลผลิตที่ลดลง เพราะแคดเมียมมีผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ และกระบวนการสังเคราะห์แสงลดลง



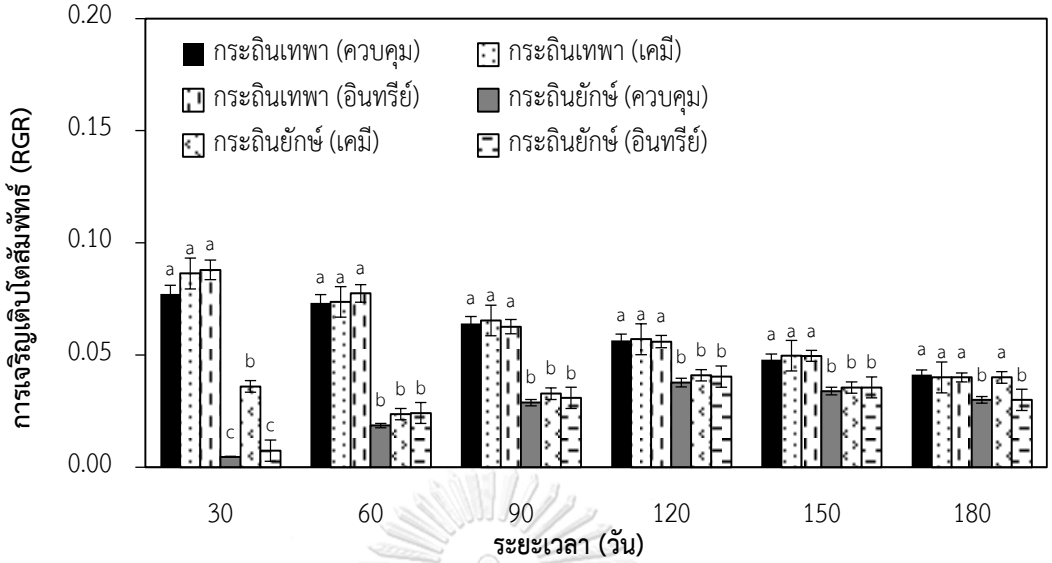
รูปที่ 4.13 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

ตารางที่ 4.12 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

ระยะเวลา (วัน)	อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์			
	ชุดควบคุม	กระถินเทพา	ชุดควบคุม	กระถินยักษ์
30	$0.08^{a} \pm 0.05$	$0.08^{a} \pm 0.01$	$0.03^{b} \pm 0.02$	$0.03^{b} \pm 0.01$
60	$0.07^{a} \pm 0.07$	$0.08^{a} \pm 0.01$	$0.01^{b} \pm 0.04$	$0.02^{b} \pm 0.04$
90	$0.06^{a} \pm 0.01$	$0.07^{a} \pm 0.01$	$0.03^{b} \pm 0.02$	$0.03^{b} \pm 0.04$
120	$0.06^{a} \pm 0.01$	$0.06^{a} \pm 0.07$	$0.02^{b} \pm 0.08$	$0.03^{b} \pm 0.05$
150	$0.05^{a} \pm 0.03$	$0.05^{a} \pm 0.05$	$0.02^{b} \pm 0.08$	$0.02^{b} \pm 0.07$
180	$0.04^{a} \pm 0.08$	$0.04^{a} \pm 0.05$	$0.02^{b} \pm 0.01$	$0.02^{b} \pm 0.02$

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.14 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ตารางที่ 4.13 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ระยะเวลา (วัน)	อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์					
	ชุดควบคุม	กระถินเทพา-เคมี	กระถินเทพา-อินทรีย์	ชุดควบคุม	กระถินยักษ์-เคมี	กระถินยักษ์-อินทรีย์
30	0.09^{a} ±0.00	0.09 ^{a} ± 0.00	0.09 ^{a} ± 0.00	0.03± 0.00	0.04 ^{b}±0.01	0.01 ^{c}±0.00
60	0.07^{a}± 0.00	0.07 ^{a} ± 0.00	0.08 ^{a} ± 0.00	0.02^{b}±0.00	0.02 ^{b}±0.00	0.02 ^{b}±0.00
90	0.06^{a}± 0.00	0.07 ^{a}± 0.00	0.06 ^{a}± 0.00	0.03^{b}±0.00	0.03 ^{b}±0.00	0.03 ^{b}±0.00
120	0.06^{a}±0.00	0.06 ^{a}± 0.00	0.06^{a} ± 0.00	0.04^{b}±0.00	0.04 ^{b}±0.00	0.04 ^{b}±0.00
150	0.05^{a}± 0.00	0.05 ^{a}± 0.00	0.05 ^{a}± 0.00	0.03^{b}±0.00	0.04 ^{b}±0.00	0.04 ^{b}±0.00
180	0.04^{a}± 0.00	0.04 ^{a}±0.001	0.04 ^{a}± 0.00	0.04^{a}± 0.00	0.04 ^{a}±0.00	0.03 ^{b}±0.00

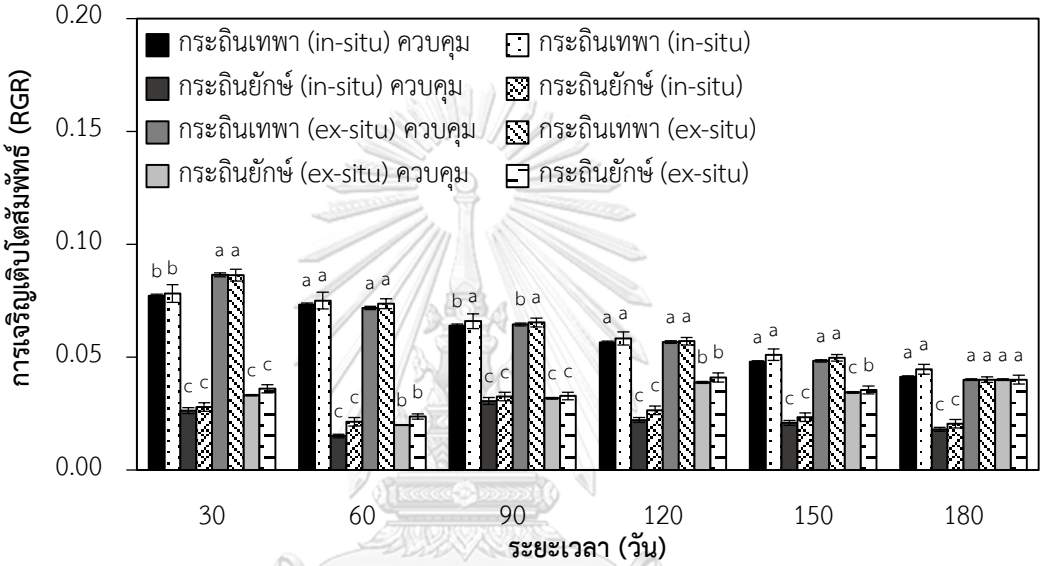
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

5) พืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชใบเลี้ยงคู่ที่ทำการปลูกในโรงเรือน ประกอบด้วย 6 ชุดการทดลอง (ดังรูปที่ 4.13) พบว่า พืชทดลองมีค่าการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น และจากการทดลองในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า กระถินเทพาที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีและกระถินเทพาที่มีการใส่ปุ๋ยอินทรีย์มีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดลงอย่างชัดเจน กล่าวคือ ในช่วง 30 วันแรกของการทดลอง พบว่า พืชมีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์เท่ากับ 0.09 และ 0.09 ดังตารางที่ 4.13 และเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นทุกๆ 30 วัน พบว่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์มีค่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลดลง และยังพบว่า อัตราการเจริญเติบโตของกระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมีและกระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยเฉพาะเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์มีค่าลดลงเท่ากับ 0.04 และ 0.04 ตามลำดับของชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษา จันทร์จรัส วีรสาร และคณะ (2550) ทำการเปรียบเทียบชุดการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์ (T4, T5, T6 และ T7) กับชุดการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว (T3) พบว่า พืชมีการเจริญเติบโตด้านความสูงไม่แตกต่างกันทางสถิติ



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6) เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของพืชใบเลี้ยงคู่

เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชทดลองในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) กับชุดทดลองในโรงเรือน (Ex-situ) ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี (ดังรูปที่ 4.14) พบว่า ในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) กระถินเทพาชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และกระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือน (Ex-situ) มีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์เท่ากับ 0.04 และ 0.04 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่ากระถินยักษ์ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) กับชุดทดลองในโรงเรือน (Ex-situ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.02 และ 0.04 ตามลำดับนอกจากนี้ยังพบว่า กระถินเทพาชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือน (Ex-situ) มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ระยะเวลา (วัน)	อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์							
	ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง In-situ				ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง Ex-situ			
	ชุดควบคุม	กระถินเทพา	ชุดควบคุม	กระถินยักษ์	ชุดควบคุม	กระถินเทพา-เคมี	ชุดควบคุม	กระถินยักษ์-เคมี
30	0.08^{b} ±0.06	0.08 ±0.01	0.03^{c} ±0.07	0.03^{c} ±0.07	0.09^{a} ±0.03	0.09^{a} ±0.05	0.03^{c} ±0.01	0.04 ±0.01
60	0.07 ±0.01	0.08 ±0.01	0.01^{c} ±0.07	0.02^{b} ±0.03	0.07^{a} ±0.04	0.07^{a} ±0.01	0.02^{b} ±0.01	0.02 ±0.01
90	0.06 ±0.05	0.07 ±0.05	0.03^{c} ±0.04	0.03^{c} ±0.01	0.06^{b} ±0.01	0.07^{a} ±0.09	0.03^{c} ±0.03	0.03 ±0.01
120	0.06 ±0.01	0.06 ±0.01	0.02^{c} ±0.07	0.03^{c} ±0.07	0.06^{a} ±0.04	0.06^{a} ±0.05	0.04^{b} ±0.01	0.04^{b} ±0.02
150	0.05 ±0.01	0.05^{a} ±0.09	0.02^{c} ±0.08	0.02^{c} ±0.01	0.05^{a} ±0.06	0.05^{a} ±0.06	0.03^{c} ±0.09	0.04^{b} ±0.01
180	0.04 ±0.01	0.04^{a} ±0.02	0.02^{b} ±0.02	0.02^{b} ±0.05	0.04^{a} ±0.05	0.04^{a} ±0.01	0.04^{a} ±0.09	0.04^{a} ±0.07

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.6 การแสดงความเป็นพิษของพืช (Phytotoxicity)

จากผลการศึกษาการแสดงความเป็นพิษของพืชทดลองในกลุ่มพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ได้แก่ หญ้าแฝก และไผ่ป่า และใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ กระถินเทพา และกระถินยักษ์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ได้แก่ (1) กระถินเทพา (ควบคุม) (2) กระถินเทพา (3) กระถินยักษ์ (ควบคุม) (4) กระถินยักษ์ (5) หญ้าแฝก (ควบคุม) (6) หญ้าแฝก (7) ไผ่ป่า (ควบคุม) และ (8) ไผ่ป่า และ 2) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ได้แก่ (1) หญ้าแฝก (ควบคุม) (2) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี (3) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ (4) ไผ่ป่า (ควบคุม) (5) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี (6) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ (7) กระถินเทพา (ควบคุม) (8) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี (9) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ (10) กระถินยักษ์ (ควบคุม) (11) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี (12) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ โดยทำการศึกษาการแสดงความเป็นพิษที่พืชได้รับจากสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ ด้วยการสังเกตและประเมินด้วยสายตา และทำการจดบันทึกเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษที่พืชได้รับ

(Phytotoxicity หรือ Plant Injury) ในทุกๆ สัปดาห์ จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาสรุปเป็นรายเดือน ซึ่งสามารถแสดงผลการประเมินความเป็นพิษของพืชทดลอง ได้ดังตารางที่ 4.15 โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังนี้

4.6.1 การแสดงความเป็นพิษของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว

จากการศึกษาการแสดงความเป็นพิษของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ได้แก่ หญ้าแฝก และไผ่ป่า โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 1) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และ 2) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ทำการสังเกตด้วยสายตา และเก็บข้อมูลที่ระยะเวลา 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน ผลการสังเกตความเป็นพิษของพืชศึกษา มีลักษณะดังต่อไปนี้

1) พืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

การแสดงความเป็นพิษของหญ้าแฝกและไผ่ป่า โดยการประเมินจากการสังเกตด้วยสายตาในวันที่ 0 หรือก่อนทำการปลูกในพื้นที่บ่อกักเก็บกากโลหกรรม พบว่า แผ่นใบมีสีเขียว จำนวนใบไม่มาก และลำต้นไม่สูงมาก เมื่อเริ่มเข้าสู่วันที่ 90 พบว่า หญ้าแฝกแสดงอาการขอบใบเหลือง และปลายใบหงิก ส่วนไผ่ป่าแสดงอาการขอบใบเหลืองเริ่มจากโคนใบขนานไปตามความยาวใบ (รูปที่ 4.15 และ 4.16) ทั้งนี้เนื่องจากสารหนู และแมงกานีสไปขัดขวางกระบวนการสังเคราะห์แสง และขัดขวางการดูดดึงธาตุอาหารต่างๆ ของหญ้าแฝกและไผ่ป่า จึงทำให้เกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหาร (สุภาพร แป้งทา, 2552) ซึ่งสอดคล้องกับ Sampanpanish และคณะ (2008) ที่ทำการศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้สาบเสือและหญ้าแฝก ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ พบว่า โลหะหนักส่งผลให้สาบเสือ และหญ้าแฝกแสดงอาการเป็นพิษ เช่น ใบซีดขาว ใบหงิก และใบไหม้ เป็นต้น จากตารางที่ 4.15 แสดงความเป็นพิษของพืชทดลองที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน โดยพบว่า เปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของพืชจะเพิ่มขึ้นตามอายุของพืชทดลองที่เพิ่มขึ้น โดยในวันเริ่มต้นการทดลอง (30 วัน) หญ้าแฝกและไผ่ป่าไม่มีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษหรือมีค่าเท่ากับ 0 และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษเท่ากับ 2.24 และ 3.09 ตามลำดับ ของหญ้าแฝกและไผ่ป่า ทั้งนี้ยังพบว่า ไผ่ป่ามีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษสูงกว่าหญ้าแฝก

2) พืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

จากการศึกษาการแสดงความเป็นพิษของหญ้าแฝกและไผ่ป่าชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) โดยการประเมินจากการสังเกตด้วยสายตาในวันที่ 0 หรือก่อนทำการปลูกในโรงเรือนทดลอง พบว่าภายหลังจากทำการปลูกในโรงเรือนทดลอง ตลอดระยะเวลาตั้งแต่ 0-60 วัน พบว่า หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี และไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี ที่ปลูกในโรงเรือน (Ex-situ) พืชมีการแสดงอาการความเป็นพิษอย่างรวดเร็ว และเห็นได้ชัดเจน ต่างจากชุดการทดลองอื่นๆ โดยหญ้าแฝกเริ่มมีอาการใบเหลืองในวันที่ 60 จากนั้นเริ่มมีอาการใบไหม้เริ่มจากโคนใบขนานไปตามความยาวใบในวันที่ 180

วัน ส่วนไผ่ป่าในวันที่ 60 เริ่มมีอาการไหม้ที่ปลายใบ และแสดงอาการไหม้เต็มใบในวันที่ 180 วัน (ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18) และการแสดงความเป็นพิษของพืชในแต่ละชุดทดลองที่เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาของการทดลอง เป็นที่น่าสังเกตว่า ในชุดการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี สามารถทำให้พืชมีการแสดงความเป็นพิษได้มากกว่าชุดการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ ผลจากการสังเกตในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาปริมาณการดูดดึงสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์เข้าสู่พืชทดลอง โดยพบว่าในพืชชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีปริมาณการดูดดึงสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์สูงขึ้น นอกจากนี้การแสดงความเป็นพิษดังกล่าวยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Morten และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาการกำจัดความเป็นพิษของโพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN) ด้วยต้นปอเทือง (*Solix viminalis*) ผลการทดลองพบว่า พืชสามารถดูดความเป็นพิษได้มากที่บริเวณราก ใบ และลำต้นตามลำดับ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาในครั้งนี้ อาการแสดงความเป็นพิษที่สังเกตได้ในวันสุดท้ายของการทดลอง พบว่า แผ่นใบของพืชศึกษาบางส่วนเริ่มมีสีเหลืองซีด เส้นขอบใบ (Vein) เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเป็นสีขาวซีด และเริ่มมีสีน้ำตาล หรือพืชแสดงอาการแผ่นใบสีขาวซีดมากขึ้น บางส่วนมีสีเหลือง และสีน้ำตาลชัดเจนมากขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบการแสดงอาการของพืชที่ขาดธาตุอาหาร และพืชเป็นโรค สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังภาคผนวก ข และจากตารางที่ 4.15 การแสดงความเป็นพิษของพืชทดลองที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของพืชจะเพิ่มขึ้นตามอายุของพืชทดลองที่เพิ่มขึ้น โดยในวันเริ่มต้นการทดลอง (30 วัน) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ และไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ พบว่า ทุกชุดทดลองไม่มีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษหรือเท่ากับ 0 ทั้งหมด และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษเท่ากับ 42.30, 37.02, 2.23 และ 3.09 ตามลำดับ โดยพบว่า หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษสูงกว่าในทุกชุดการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3) เปรียบเทียบการแสดงความเป็นพิษของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว

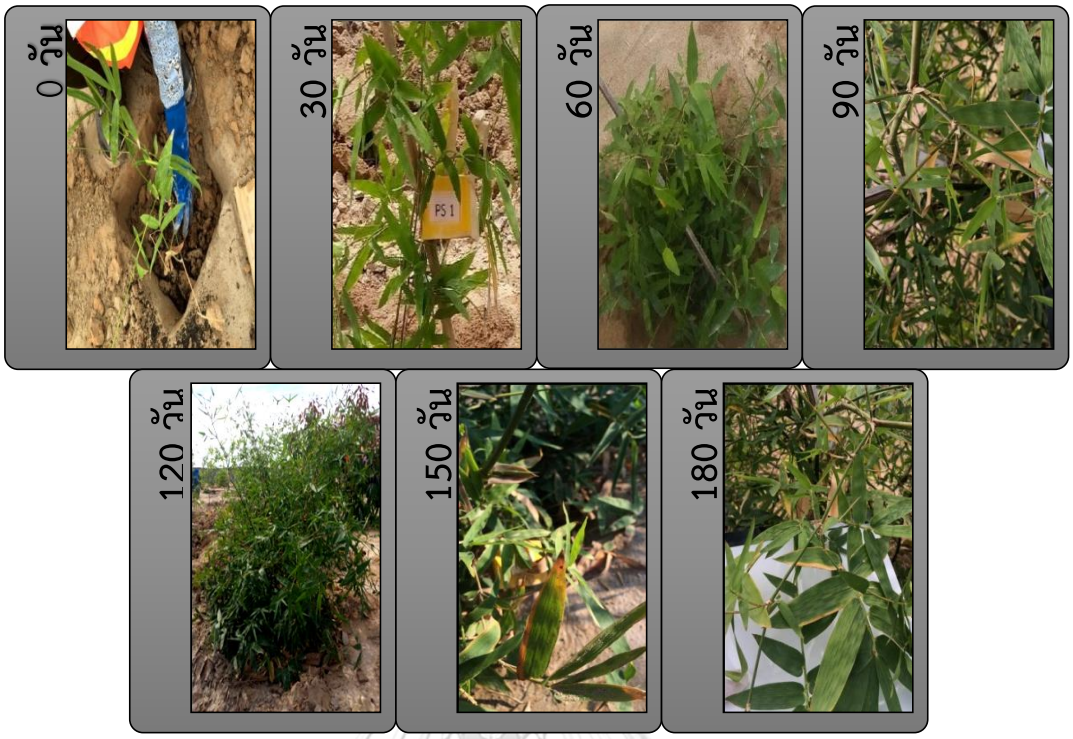
เมื่อทำการเปรียบเทียบการแสดงความเป็นพิษของพืชทดลองในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) กับชุดทดลองในโรงเรือน (Ex-situ) (ดังตารางที่ 4.15) พบว่า การแสดงความเป็นพิษของพืชในแต่ละชุดทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่เริ่มต้นการทดลอง (0วัน) จนสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) โดยชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษที่สูงกว่าชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีจะมีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษที่สูงกว่าชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ ซึ่งหญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษสูงที่สุด (ดังรูปที่ 4.19) รองลงมาคือ ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีค่าเท่ากับ 42.30 และ 37.02 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนหญ้าแฝก และไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ มีค่าเท่ากับ 1.65 และ 2.73 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการศึกษาในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาปริมาณการดูดดึงและ

สะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในพืชทดลองโดยพบว่า หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีความสามารถในการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ได้สูง จึงส่งผลให้พืชทดลองแสดงอาการความเป็นพิษออกมา

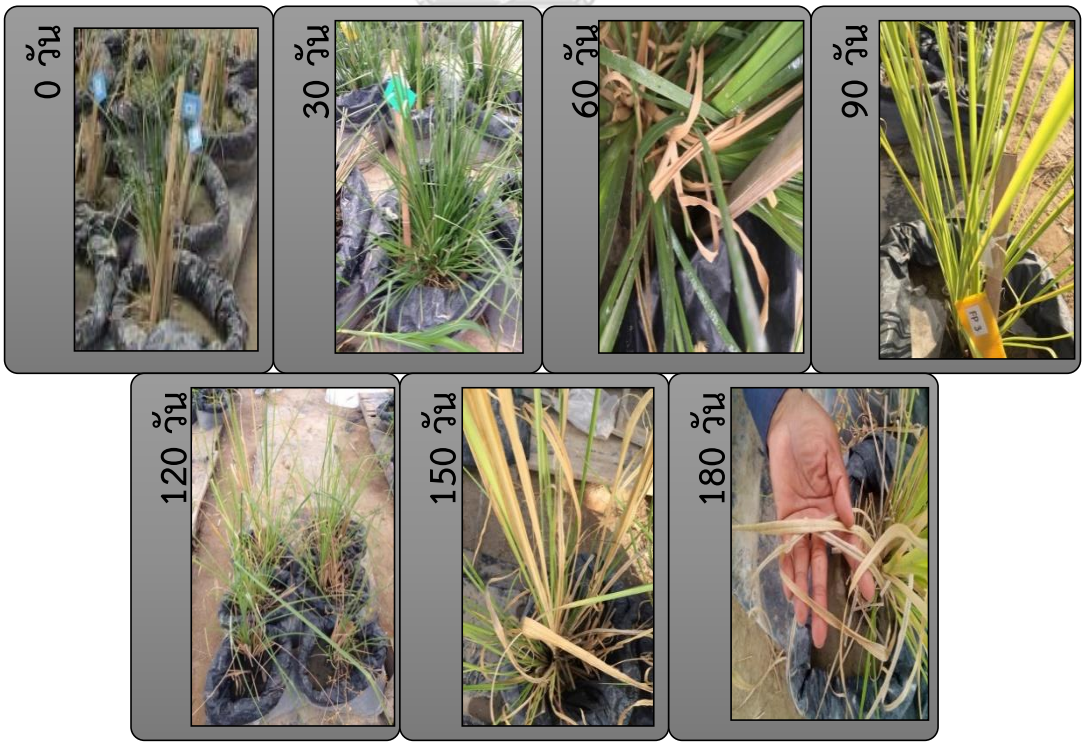
ตารางที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของพืชทดลองจากสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์

ระยะเวลา (วัน)	ความเป็นพิษ (เปอร์เซ็นต์)									
	ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง					ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง				
	ชุดควบคุมหญ้าแฝก	ชุดควบคุมไผ่ป่า	หญ้าแฝก	ไผ่ป่า	ชุดควบคุมหญ้าแฝก	ชุดควบคุมไผ่ป่า	หญ้าแฝก-เคมี	ไผ่ป่า-เคมี	หญ้าแฝก-อินทรีย์	ไผ่ป่า-อินทรีย์
30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	1.07	1.78	1.60	2.48	16.36	1.83	24.89	19.02	1.33	2.63
90	1.43	1.88	1.71	2.57	18.02	17.81	26.93	22.68	1.38	2.53
120	1.54	2.14	1.93	2.50	23.97	24.58	31.02	29.23	1.59	2.51
150	1.90	1.78	2.12	2.72	29.75	30.81	37.04	34.15	1.65	2.73
180	1.49	2.53	2.24	3.09	36.28	19.30	42.30	37.02	2.23	3.09

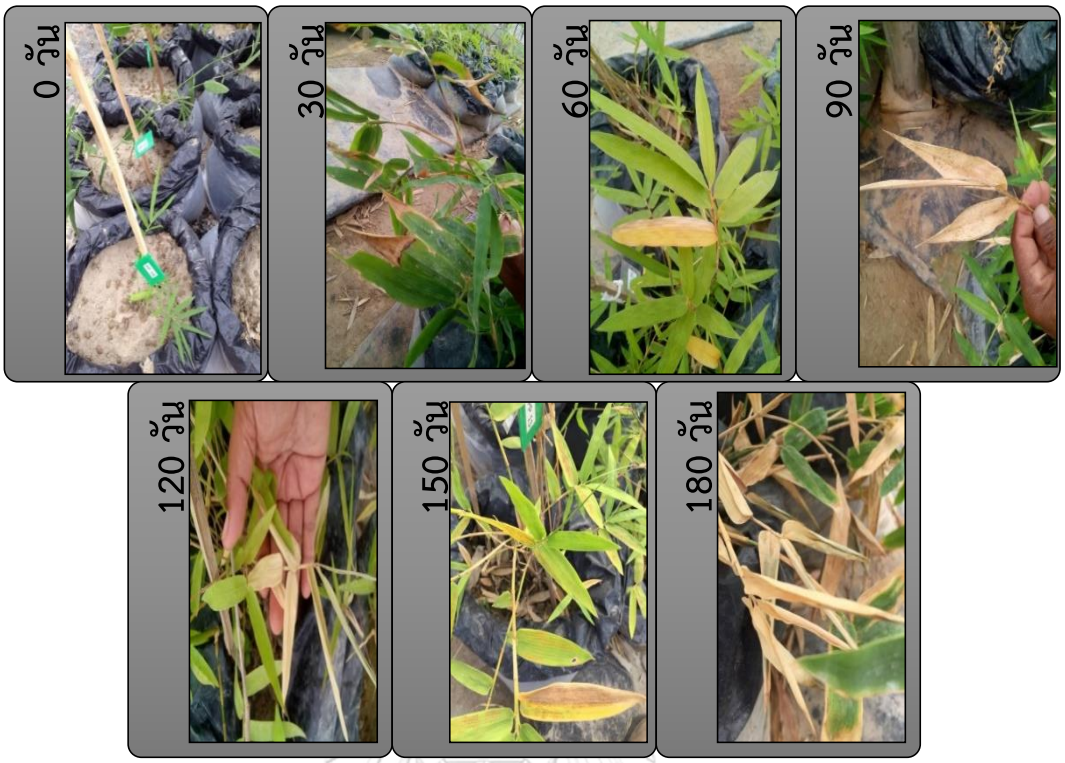
รูปที่ 4.16 อาการแสดงความเป็นพิษของหญ้าแฝกชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)



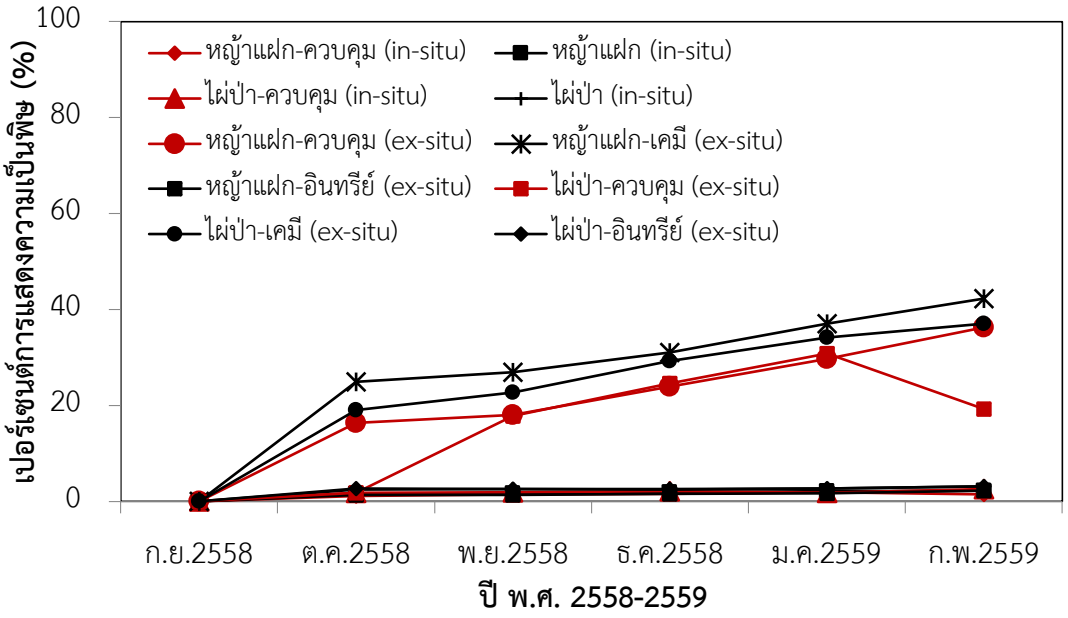
รูปที่ 4.17 อาการแสดงความเป็นพิษของไผ่ป่าชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)



รูปที่ 4.18 อาการแสดงความเป็นพิษของหญ้าแฝกชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)



รูปที่ 4.19 อาการแสดงความเป็นพิษของไผ่ป่าชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)



รูปที่ 4.20 เปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวจากสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์

4.6.2 การแสดงความเป็นพิษของพืชใบเลี้ยงคู่

จากการศึกษาการแสดงความเป็นพิษของพืชใบเลี้ยงคู่ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 1) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และ 2) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่ระยะเวลาที่ทำการสังเกตด้วยสายตาและทำการบันทึกข้อมูลที่ 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน ผลการสังเกตความเป็นพิษของพืชทดลอง (ตารางที่ 4.16) มีลักษณะดังนี้

1) พืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

จากการศึกษาการแสดงความเป็นพิษของกระถินเทพา และกระถินยักษ์ ด้วยการประเมินจากการสังเกตด้วยสายตาในวันที่ 0 หรือก่อนทำการปลูกในพื้นที่บ่อกักเก็บกากโลหกรรม พบว่า กระถินเทพา แผ่นใบมีสีเขียว จำนวนใบไม่มาก และลำต้นไม่สูง และที่ระยะ 30-90 วัน หลังการปลูกพืชทดลอง พบว่า กระถินเทพามีการเจริญเติบโตปกติดี โดยแผ่นใบยังไม่มีการเปลี่ยนสีของใบ แผ่นใบใหญ่มากขึ้น ลำต้นสูงขึ้น และมีการแตกกิ่งก้านมากขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป 120 วัน หลังการปลูก พบว่า กระถินเทพามีแผ่นใบบางส่วนเริ่มมีสีเหลืองซีด เส้นขอบใบ (Vein) เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเป็นสีขาวซีด เริ่มมีสีน้ำตาล และแผ่นใบสีขาวซีดมากขึ้น และในวันที่ 150 และ 180 วัน พบว่า แผ่นใบบางส่วนมีสีเหลือง และสีน้ำตาลชัดเจนมากขึ้น (ดังรูปที่ 4.20) สำหรับกระถินยักษ์ (ดังรูปที่ 4.21) เมื่อเริ่มต้นทำการปลูก พบว่า แผ่นใบมีสีเขียว จำนวนใบไม่มาก และลำต้นไม่สูงมาก หากแต่ภายหลังทำการปลูกในพื้นที่บ่อกักเก็บกากแร่ทองคำ ในระยะเวลา 30 ถึง 60 วัน หลังจากการปลูก พบว่า กระถินยักษ์มีการเจริญเติบโตปกติ โดยแผ่นใบไม่มีการเปลี่ยนสีของใบ แผ่นใบใหญ่มากขึ้น ลำต้นสูงขึ้น และมีการแตกกิ่งก้านมากขึ้น หากแต่เมื่อเวลาผ่านไป 90 วัน พบว่า แผ่นใบของกระถินยักษ์เริ่มมีสีน้ำตาล ในขณะที่ 120 วัน พบว่า ใบเริ่มมีจุดสีดำ แผ่นใบเริ่มมีสีเหลือง และที่ 150 ถึง 180 วัน พบว่า ปลายใบไหม้ แผ่นใบมีจุดสีดำ และมีสีเหลืองน้ำตาลชัดเจนขึ้น ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่า ในชุดการทดลองที่ปลูกกระถินยักษ์จะมีการแสดงอาการความเป็นพิษสูงกว่ากระถินเทพา ซึ่งจากการแสดงความเป็นพิษของพืชทดลองนี้มีความสอดคล้องกับปริมาณมวลชีวภาพของพืชทดลอง ซึ่งพบว่ากระถินยักษ์มีการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพที่ต่ำกว่ากระถินเทพา และจากตารางที่ 4.16 ผลของการแสดงความเป็นพิษของพืชทดลองที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน พบว่า เปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของพืชจะเพิ่มขึ้นตามอายุของพืชทดลองที่เพิ่มขึ้น โดยในวันเริ่มต้นการทดลอง (30 วัน) กระถินเทพาและกระถินยักษ์ไม่มีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษหรือเท่ากับ 0 และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) พบว่า มีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษเท่ากับ 4.81 และ 83.17 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า กระถินยักษ์มีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษสูงกว่ากระถินเทพา

2) พืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

การแสดงความเป็นพิษของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) โดยการประเมินจากการสังเกตด้วยสายตาในวันที่ 0 หรือก่อนทำการปลูกในโรงเรือนทดลอง

พบว่า กระถินเทพามีแผ่นใบมีสีเขียว จำนวนใบไม่มากและลำต้นไม่สูง ส่วนกระถินยักษ์มีแผ่นใบมีสีเขียว จำนวนใบไม่มาก และลำต้นไม่สูงเช่นกัน ภายหลังจากทำการปลูกในโรงเรือนทดลอง พบว่า กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี และกระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีการแสดงอาการความเป็นพิษอย่างเห็นได้ชัดและรวดเร็ว ต่างจากชุดการทดลองอื่น ๆ โดยกระถินเทพาเริ่มมีอาการใบเหลืองในวันที่ 60 จากนั้นเริ่มมีอาการใบไหม้ในวันที่ 90 และมีอาการไหม้กรอบเต็มใบในวันที่ 180 วัน (ดังรูปที่ 4.22) ส่วนกระถินยักษ์ในวันที่ 60 เริ่มปรากฏมีจุดดำๆ ขึ้นในแผ่นใบ ในวันที่ 90 แผ่นใบเริ่มมีสีน้ำตาล และที่ 120 วัน พบว่า แผ่นใบเริ่มมีสีเหลือง และที่ 180 วัน พบว่า ปลายใบไหม้ แผ่นใบมีจุดสีดำและมีสีเหลืองน้ำตาลชัดเจนขึ้น (ดังรูปที่ 4.23) เป็นที่น่าสังเกตว่า ในชุดการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี จะทำให้พืชมีการแสดงความเป็นพิษได้มากกว่าชุดการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ อีกทั้งผลจากการสังเกตในครั้งนี้ยังพบว่า ชุดการทดลองปลูกกระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษสูงที่สุด รองลงมาคือ กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีค่าเท่ากับ 94.17 และ 42.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ประกอบกับเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยการทดสอบคลีนิคสุขภาพพืชวิชาโรคพืช คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน พบว่า กลุ่มของพืชใบเลี้ยงคู่ไม่พบหรือปรากฏโรคพืชใดๆ จากตารางที่ 4.16 พบว่า เปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของพืชทดลองที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน เปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของพืชจะเพิ่มขึ้นตามอายุของพืชทดลองที่เพิ่มขึ้น โดยในวันเริ่มต้นการทดลอง (30 วัน) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ และกระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ไม่มีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษทั้งหมด และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษเท่ากับ 42.30, 94.17, 2.23 และ 3.09 ตามลำดับ โดยพบว่ากระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมีจะมีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ

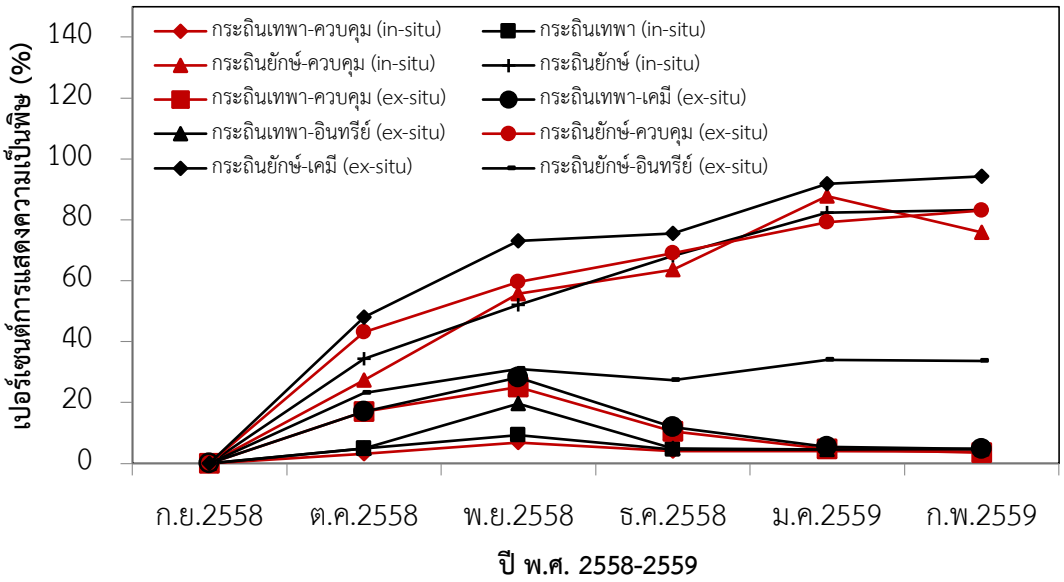
3) เปรียบเทียบการแสดงความเป็นพิษของพืชใบเลี้ยงคู่

เมื่อทำการเปรียบเทียบการแสดงความเป็นพิษของพืชทดลองในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) กับชุดทดลองในโรงเรือน (Ex-situ) (ดังตารางที่ 4.16) พบว่า การแสดงความเป็นพิษของพืชในแต่ละชุดทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่เริ่มต้นการทดลอง (0 วัน) จนสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) โดยชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษสูงกว่าชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี พบว่า มีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษสูงกว่าชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ ซึ่งกระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมีจะมีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษสูงที่สุด รองลงมาคือ กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีค่าเท่ากับ 94.17 และ 42.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนกระถินยักษ์ และกระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ มีค่าเท่ากับ 3.09 และ 2.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังรูปที่ 2.24) ผลจากการศึกษาในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับ ผลการศึกษาอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของกระถินยักษ์ พบว่า มีค่าต่ำกว่ากระถินเทพา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก

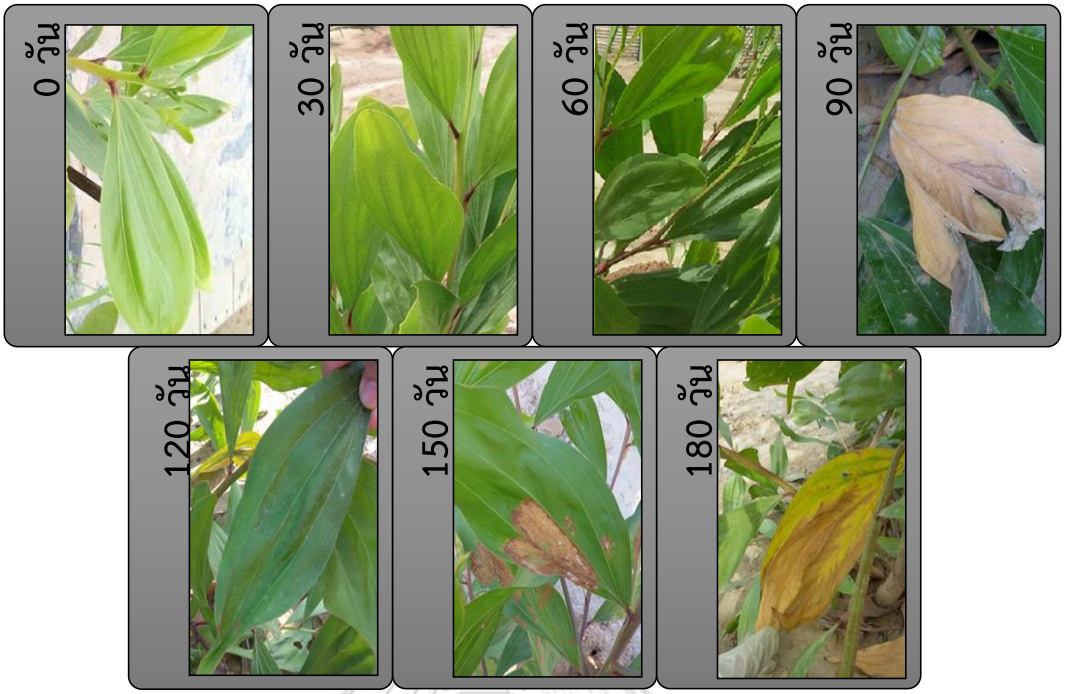
ปริมาณการสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในพืชมีปริมาณเพิ่มขึ้น จึงส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง และส่งผลให้มวลชีวภาพลดลง รวมทั้งมีการยับยั้งและลดการเจริญเติบโตด้านความสูงของลำต้น และส่งผลให้พืชตายได้ในที่สุด โดยมีตัวอย่างงานวิจัยที่ทดสอบในพืชหลายชนิด เช่น ธูปฤาษี บอน พุทธรักษา และกกอียิปต์ มีมวลชีวภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัด ใบมีจำนวนลดลง ลำต้นเตี้ย และแคระแกรน รวมทั้งมีจำนวนราก และหน่อลดลงด้วย (Jomjun, 2009)

ตารางที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของพืชทดลองจากสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

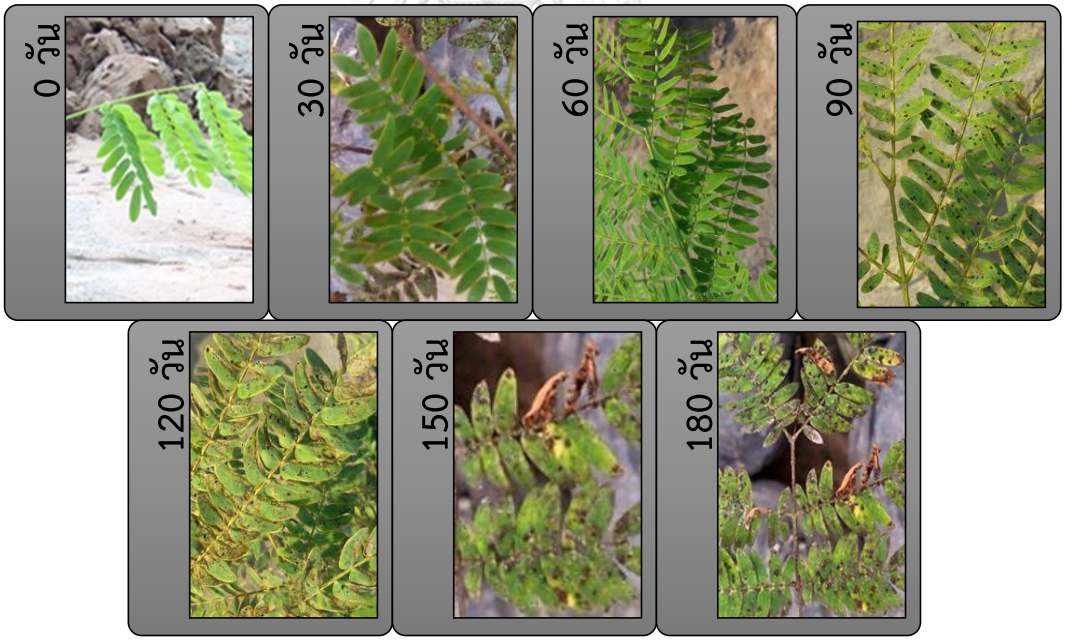
ระยะเวลา (วัน)	ความเป็นพิษ (เปอร์เซ็นต์)									
	ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)				ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)					
	ชุดควบคุม กระถินเทพา	ชุดควบคุม กระถินยักษ์	กระถินเทพา	กระถินยักษ์	ชุดควบคุม กระถินเทพา	ชุดควบคุม กระถินยักษ์	กระถินเทพา-เคมี	กระถินยักษ์-เคมี	กระถินเทพา-อินทรีย์	กระถินยักษ์-อินทรีย์
30	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60	3.14	27.27	1.60	2.48	17.00	43.13	24.89	48.00	1.33	2.63
90	6.80	55.64	1.71	2.57	25.03	59.61	26.93	73.01	1.38	2.53
120	4.11	63.61	1.93	2.50	10.48	69.09	31.02	75.47	1.59	2.51
150	4.09	87.73	2.12	2.72	4.82	79.20	37.04	91.76	1.65	2.73
180	3.83	75.82	2.20	3.14	3.48	83.05	42.30	94.17	2.23	3.09



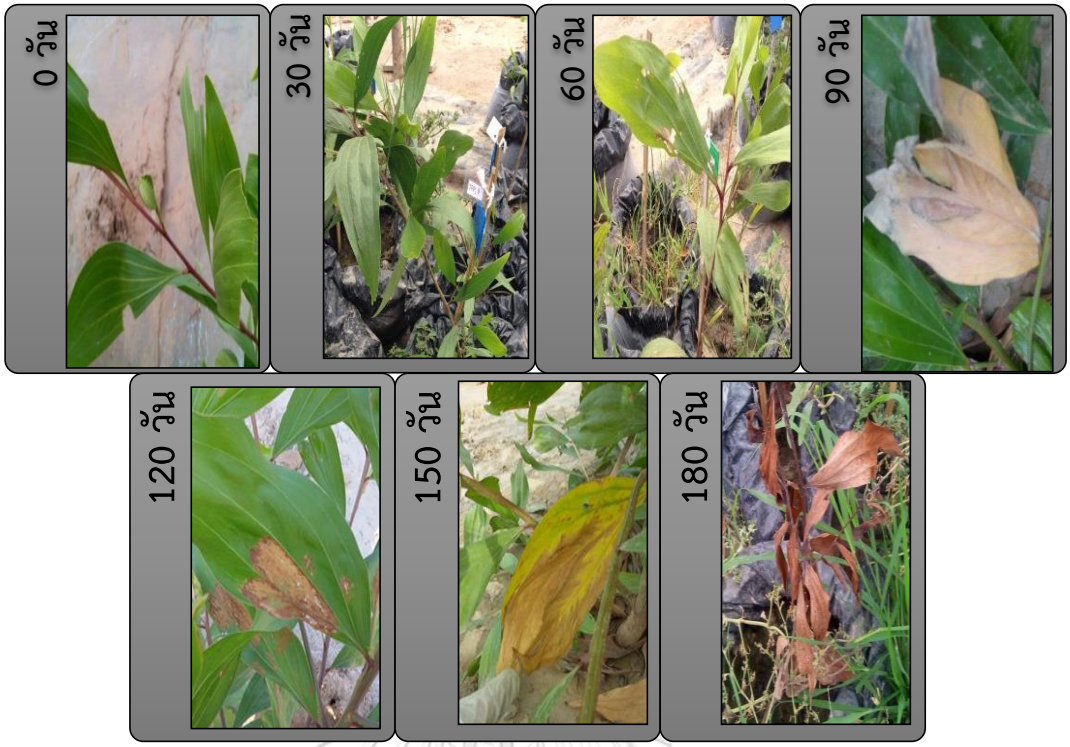
รูปที่ 4.21 เปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของพืชใบเลี้ยงคู่จากสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์



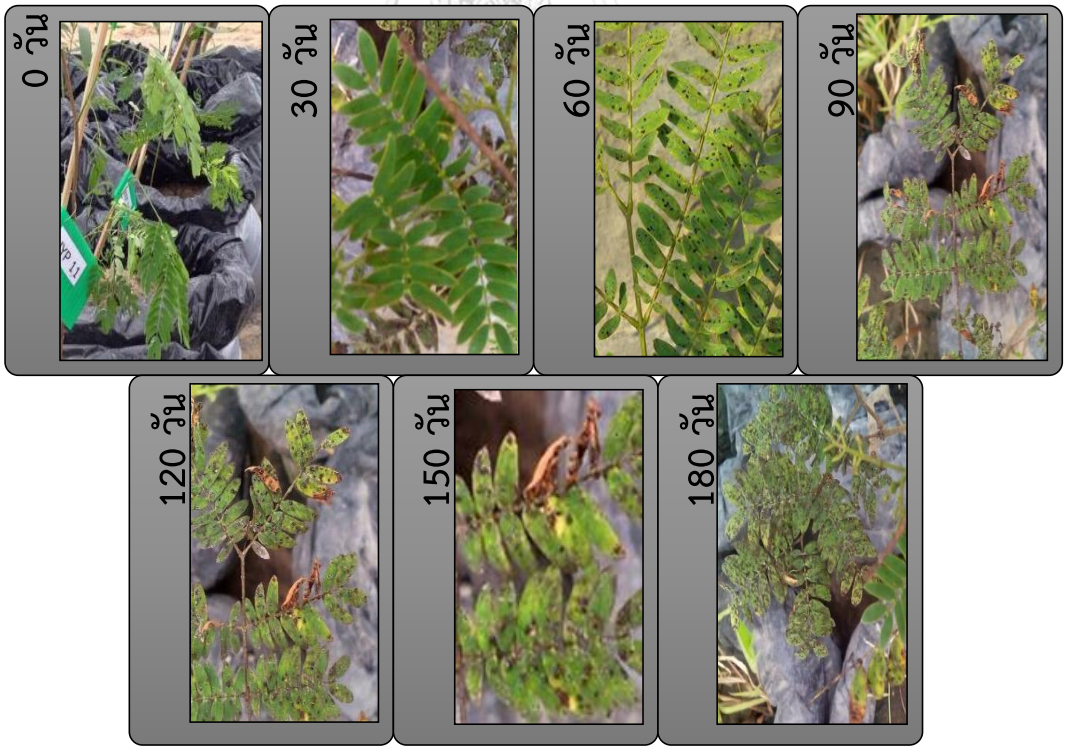
รูปที่ 4.22 อาการแสดงความเป็นพิษของกระถินเทพาชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)



รูปที่ 4.23 อาการแสดงความเป็นพิษของกระถินยักษ์ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)



รูปที่ 4.24 อาการแสดงความเป็นพิษของกระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)



รูปที่ 4.25 อาการแสดงความเป็นพิษของกระถินยักษ์ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

4.7 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ ในส่วนต่างๆ ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว

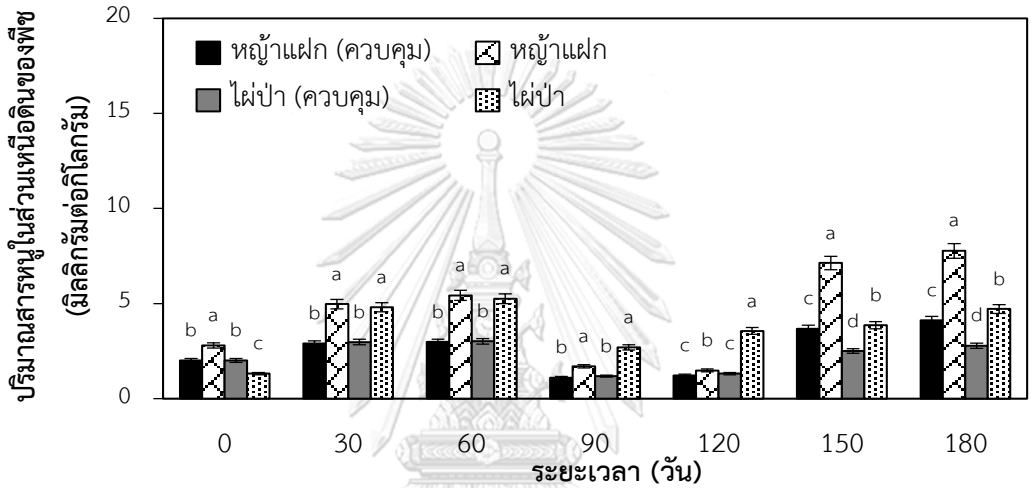
4.7.1 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อปริมาณการสะสมสารหนูของหญ้าแฝกและไผ่ป่า

การศึกษาผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึงสารหนูในส่วนต่างๆ ของพืชทดลอง และจากการตรวจวิเคราะห์ค่าปริมาณสารหนูในพืชทดลอง ซึ่งแบ่งออกเป็นการปลูกในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ได้แก่ 1) หญ้าแฝก (ควบคุม) 2) หญ้าแฝก 3) ไผ่ป่า (ควบคุม) 4) ไผ่ป่า และการปลูกในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ได้แก่ 1) หญ้าแฝก (ควบคุม) 2) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี 3) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 4) ไผ่ป่า (ควบคุม) 5) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี 6) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ โดยได้ทำการศึกษาในช่วงระยะเวลาการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน ผลการศึกษาสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

ปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้ดิน(ราก) ของหญ้าแฝกและไผ่ป่า ชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ที่ช่วงระยะของเวลาการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน พบว่า พืชทดลองมีแนวโน้มการดูดดึงและสะสมสารหนูในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินเพิ่มขึ้นตามระยะของการทดลองที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่าส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่า (ดังรูปที่ 4.25) มีปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูในส่วนเหนือดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 0-60 วัน และมีแนวโน้มของการสะสมสารหนูลดลงที่ระยะ 90-120 วัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากหญ้าแฝกและไผ่ป่ามีการตอบสนองต่อความเป็นพิษของสารหนู โดยสารหนูเมื่อสะสมในพืชจะเข้าไปแทรกแซงกระบวนการเมทาบอลิซึม ซึ่งส่งผลให้พืชมีการสังเคราะห์แสงและดูดดึงแร่ธาตุที่มีอยู่ในดินได้น้อยลง (Singh และคณะ 2006) อย่างไรก็ตามที่ระยะ 150-180 วัน ยังพบว่า หญ้าแฝกและไผ่ป่ามีความสามารถในการสะสมสารหนูได้เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากพืชแต่ละชนิดก็มีการปรับตัวเพื่อให้อยู่รอดในสภาวะปนเปื้อน มีการเจริญเติบโตและดูดดึงสารหนูเข้าสู่ต้นพืชได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ สายชล สุขญาณกิจ (2556) พบว่า ในระยะที่พืชมีการเจริญเติบโตทางลำต้นจะมีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วน้อยกว่าในช่วงระยะเจริญพันธุ์ถึงระยะสุกแก่ ทางสรีรวิทยาและในระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นจะมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากดินมาสะสมในส่วนต่าง ๆ ได้ต่ำกว่าระยะเจริญพันธุ์ถึงระยะสุกแก่ทางสรีรวิทยา โดยที่ 180 วัน หญ้าแฝกมีความสามารถในการดูดดึงสารหนูเข้าสู่ส่วนเหนือดินได้สูงกว่าไผ่ป่า มีค่าเท่ากับ 7.77 และ 4.71 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าการสะสมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) สำหรับในส่วนใต้ดิน (ราก) ของหญ้าแฝกและไผ่ป่า (ดังรูปที่ 4.26) พบว่า หญ้าแฝก มีแนวโน้มของการดูดดึงสารหนูเพิ่มขึ้นในช่วง 0-120 วัน และมีปริมาณการดูดดึงที่ลดลงในช่วง 150-180 วัน ส่วนไผ่ป่าพบว่า มีความสามารถใน

การดูดดึงสารหนูในส่วนใต้ดินได้สูงกว่าหญ้าแฝก โดยค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เท่ากับ 9.82 และ 5.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพืชทั้ง 4 ชุดการทดลองมีการสะสมสารหนูในส่วนใต้ดินมากกว่าส่วนเหนือดิน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ghosh และคณะ (2014) ศึกษาประสิทธิภาพของหญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนขี้เถ้าลอยที่มีสารหนู เป็นองค์ประกอบ ผลการศึกษา พบว่า หญ้าแฝกมีการสะสมโลหะหนักในส่วนใต้ดิน (ราก) สูงกว่าส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) เท่ากับ 80 และ 70 มิลลิกรัมโลหะหนักต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งพืช



รูปที่ 4.26 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมสารหนูในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้ดิน (ราก) ของหญ้าแฝกและไผ่ป่าที่ปลูกในโรงเรือน (Ex-situ) ที่ช่วงระยะเวลาการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน พบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูในส่วนเหนือดิน (ดังรูปที่ 4.27) ในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 0-60 วัน และที่ระยะ 90-120 วัน มีค่าการสะสมสารหนูที่ลดลง หลังจากนั้นช่วงระยะเวลาที่ 150-180 วัน พืชทดลองในแต่ละชุดการทดลองสามารถสะสมสารหนูได้เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมสารหนูของพืชทั้ง 4 ชุดการทดลอง ในวันที่ 180 พบว่าการดูดดึงสารหนูของพืชทดลองทั้ง 6 ชุดการทดลองมีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยหญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการดูดดึงและสะสมสารหนูในส่วนเหนือดินได้สูงที่สุด รองลงมาคือ ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี > ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > แฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > หญ้าแฝก (ควบคุม) > ไผ่ป่า

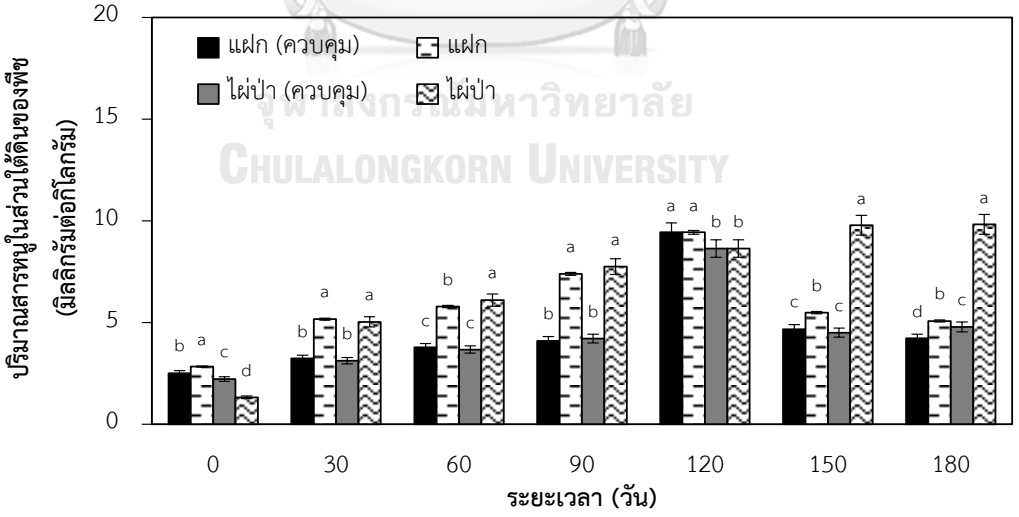
(ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 6.76 > 6.39 > 4.98 > 4.79 > 3.89 > 3.78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับของชุดการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Lorenz และคณะ (1994) ที่ได้รายงานว่า การเพิ่มแคดไอออน (K^- และ NH^+) ในปุ๋ย เป็นสาเหตุสำคัญของการเพิ่มไอออนของโลหะหนักที่มีอยู่ในสารละลายดิน จึงส่งผลทำให้ไอออนของโลหะหนักเหล่านี้ถูกดูดดึงโดยพืชมากขึ้น สำหรับการดูดดึงและสะสมสารหนูทั้งหมดในส่วนใต้ดิน (ดังรูปที่ 4.28) พบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูในส่วนใต้ดินในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมสารหนูของพืชทั้ง 6 ชุดการทดลอง ในวันที่ 180 พบว่า การดูดดึงสารหนูของพืชทดลองทั้ง 4 ชุดการทดลองมีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการดูดดึงและสะสมสารหนูในส่วนใต้ดินได้สูงที่สุด รองลงมาคือ ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > แฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > แฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี > ไผ่ป่า (ควบคุม) > หญ้าแฝก (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 6.23 > 6.03 > 4.91 > 4.44 > 3.45 > 3.40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chen และคณะ (2006) ที่ได้ทำการศึกษาการดูดดึงแคดเมียมด้วยข้าวสาลีที่มีการเติมธาตุฟอสฟอรัสระดับต่างๆ กัน และพบว่า รากของข้าวสาลีเป็นส่วนที่มีการสะสมแคดเมียมมากที่สุด ตามด้วยลำต้น เปลือกข้าว และเมล็ดข้าว ตามลำดับ และจากผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยเคมีมีการดูดดึงและสะสมสารหนูในพืชได้สูงกว่าชุดการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยอินทรีย์ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ภาริณี วนาพรรณ์ (2553) ที่ได้ทำการศึกษาผลของปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-8 ต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินและอ้อย โดยทำการปลูกอ้อยพันธุ์ LK92-11 ในดินปนเปื้อนแคดเมียมจากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ผลการศึกษาพบว่า เมื่ออัตราการใส่ปุ๋ยเคมีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อ้อยมีการดูดดึงและสะสมแคดเมียมไว้ในส่วนต่างๆ ของอ้อยเพิ่มมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3) เปรียบเทียบผลของการเติมปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูทั้งหมดของหญ้าแฝกและไผ่ป่า ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการเติมปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการดูดดึง และสะสมสารหนูทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้ดิน (ราก) ของหญ้าแฝกและไผ่ป่า ที่ปลูกในแปลงทดลอง (In-situ) และในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่ช่วงระยะเวลาการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน พบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูในส่วนเหนือดิน (ดังรูปที่ 4.29) และส่วนใต้ดิน (ราก) (ดังรูปที่ 4.30) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ได้แก่ 1) หญ้าแฝก (ควบคุม) 2) หญ้าแฝก 3) ไผ่ป่า (ควบคุม) และ 4) ไผ่ป่า มีค่าการสะสมสารหนูในส่วนเหนือดินเท่ากับ 4.12, 7.77, 2.78 และ 5.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และส่วนใต้ดินเท่ากับ 4.22, 8.80, 4.78 และ 9.82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ได้แก่ 1) หญ้าแฝก-เคมี (ควบคุม)

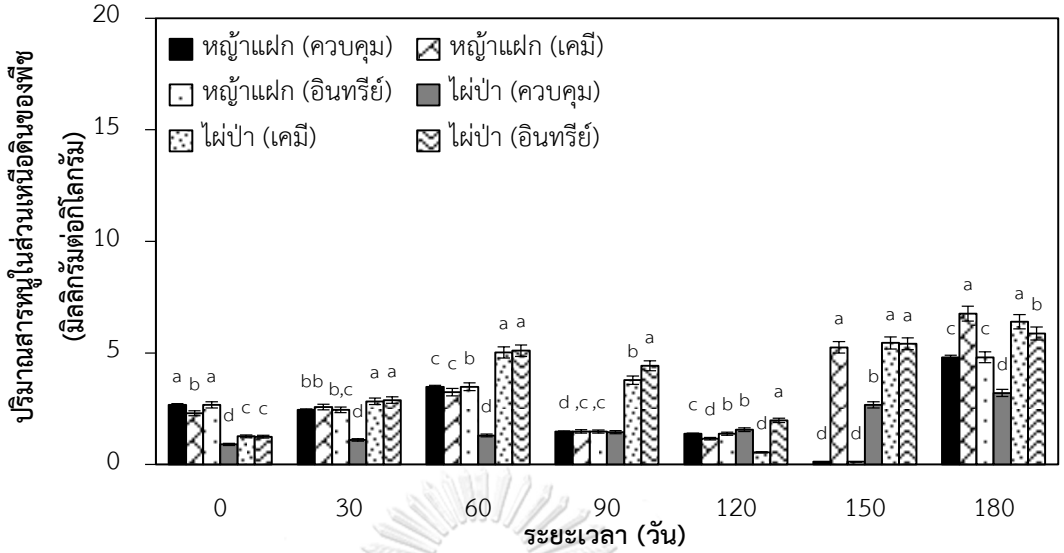
2) หญ้าแฝก-เคมี 3) ไผ่ป่า-เคมี (ควบคุม) และ 4) ไผ่ป่า-เคมี มีค่าการสะสมสารหนูในส่วนเหนือดิน เท่ากับ 3.19, 6.76, 3.20 และ 6.39 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และส่วนใต้ดินเท่ากับ 3.40, 6.83, 3.45 และ 6.40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมสารหนูในส่วนเหนือดินของพืชทดลองชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) (ดังรูปที่ 4.29) ในวันที่ 180 ของการดูดดึงและสะสมสารหนู พบว่า ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยพบว่า หญ้าแฝกชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) มีความสามารถในดูดดึงสารหนูได้สูงที่สุด รองลงมา หญ้าแฝกชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) > ไผ่ป่าชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) > ไผ่ป่าชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) มีค่าเท่ากับ 7.77 > 6.76 > 6.39 > 5.89 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับการเปรียบเทียบการสะสมสารหนูในส่วนใต้ดินของพืชทดลองชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) (ดังรูปที่ 4.30) ในวันที่ 180 ของการดูดดึงสารหนู พบว่า ค่าการสะสมสารหนูมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดย ไผ่ป่าชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) มีความสามารถในดูดดึงสารหนูได้สูงที่สุด รองลงมา ไผ่ป่าชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) > หญ้าแฝกชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (In-situ) > หญ้าแฝกชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (Ex-situ) มีค่าเท่ากับ 9.82 > 8.80 > 6.83 > 6.40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.27 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมสารหนูในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

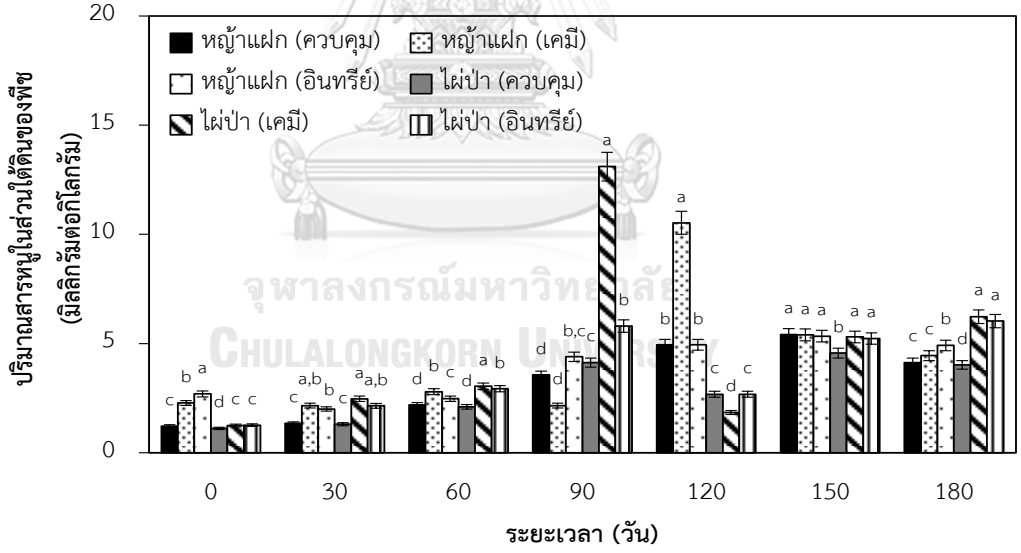
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



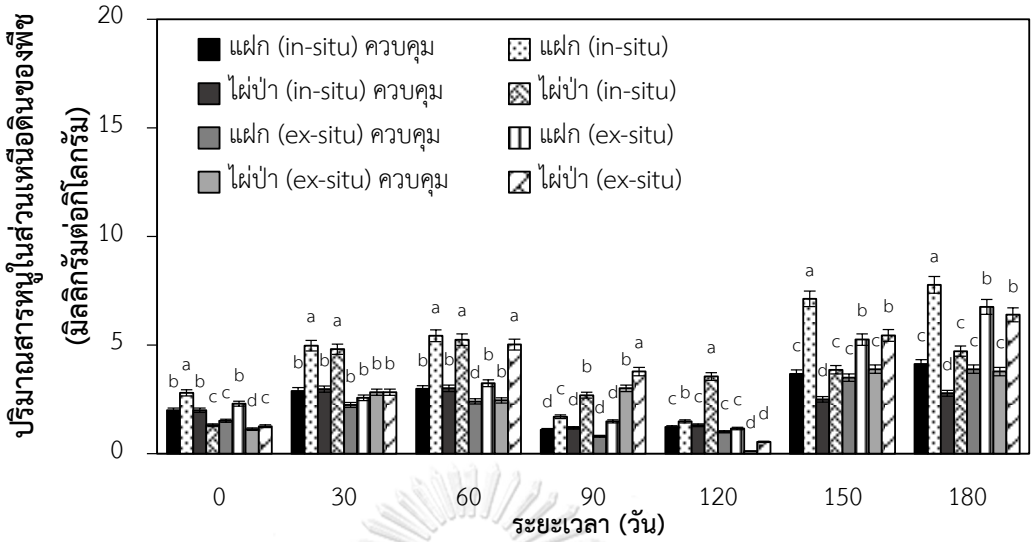
รูปที่ 4.28 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมสารหนูในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



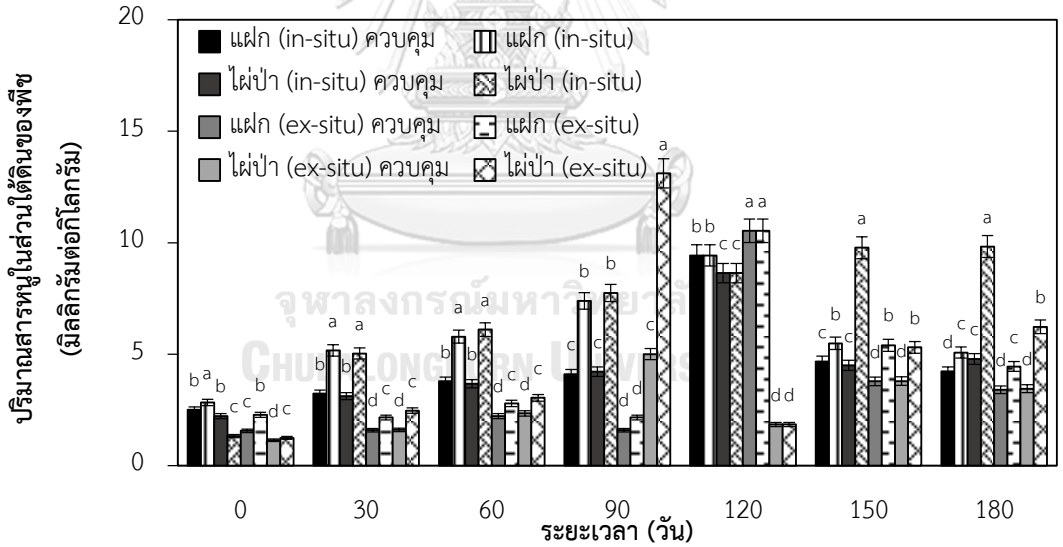
รูปที่ 4.29 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมสารหนูในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมสารหนูในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมสารหนูในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.7.2 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสของหญ้าแฝกและไผ่ป่า

การศึกษาผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึงแมงกานีสในส่วนต่างๆ ของพืชทดลอง และจากการตรวจวิเคราะห์ค่าปริมาณแมงกานีสในพืชทดลอง ซึ่งแบ่งออกเป็นการปลูกในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ได้แก่ 1) หญ้าแฝก (ควบคุม) 2) หญ้าแฝก 3) ไผ่ป่า (ควบคุม) และ 4) ไผ่ป่า และการปลูกในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ได้แก่ 1) หญ้าแฝก (ควบคุม) 2) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี 3) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 4) ไผ่ป่า (ควบคุม) 5) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี และ 6) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ โดยได้ทำการศึกษาในช่วงระยะเวลาการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน ผลการศึกษาสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

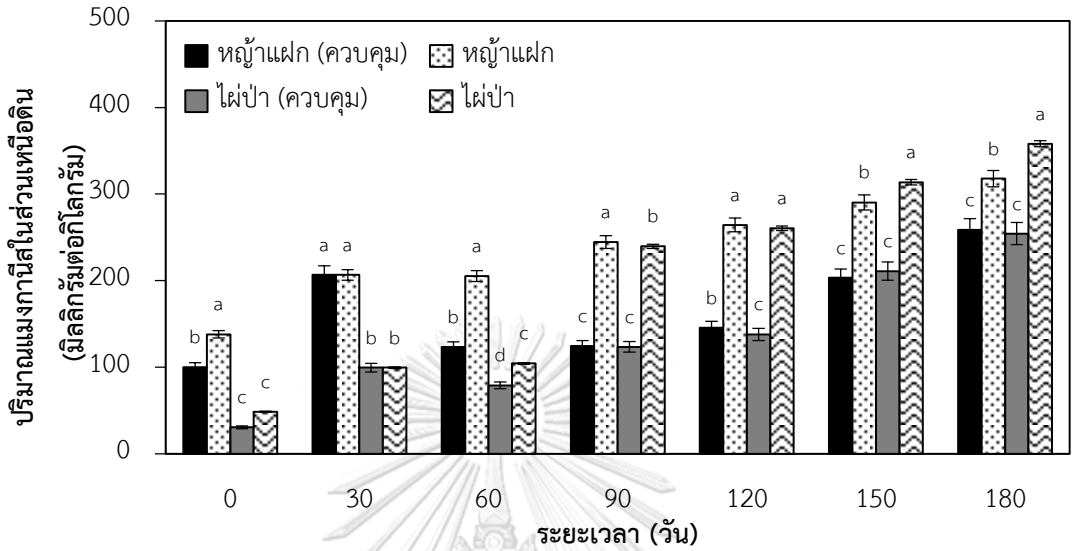
ปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้ดิน (ราก) ของหญ้าแฝกและไผ่ป่าชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ที่ช่วงระยะเวลาของการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน พบว่า มีปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือดิน (ดังรูปที่ 4.31) ในวันที่เริ่มการทดลอง (0 วัน) หญ้าแฝกและไผ่ป่ามีปริมาณแมงกานีสเท่ากับ 138.00 และ 49.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) หญ้าแฝกและไผ่ป่ามีปริมาณการดูดดึงแมงกานีสเท่ากับ 317.8 และ 358.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยไผ่ป่ามีความสามารถในการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือดินได้ดีกว่าหญ้าแฝก ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ma และคณะ (2015) ศึกษาการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสังกะสี แมงกานีส ทองแดง แคดเมียม โครเมียม และสารหนู โดยใช้หญ้าเนเปียร์ยักษ์ ผลการศึกษา พบว่า พืชที่ศึกษามีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้ทั้งในราก ลำต้น และใบ โดยส่วนใหญ่สะสมไว้ในลำต้นมากที่สุด อย่างไรก็ตามการศึกษาครั้งนี้พบปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสทั้งหมดในส่วนใต้ดิน (ราก) ของหญ้าแฝก และไผ่ป่า (ดังรูปที่ 4.32) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาของการทดลอง และค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยพบว่า วันที่เริ่มการทดลอง (0 วัน) หญ้าแฝกและไผ่ป่ามีปริมาณการสะสมแมงกานีสเท่ากับ 86.33 และ 48.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) หญ้าแฝกและไผ่ป่ามีปริมาณการดูดดึงแมงกานีสเท่ากับ 334.03 และ 401.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยพบว่า ในช่วงแรกของการทดลอง 0-60 วัน หญ้าแฝกมีความสามารถในการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในส่วนใต้ดินได้ดีกว่าไผ่ป่า ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และเมื่อเข้าสู่วันที่ 90-180 วัน พบว่า ไผ่ป่าเริ่มมีความสามารถในการดูดดึงและสะสมแมงกานีสได้สูงที่สุด โดยค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพืชใบเลี้ยงเดี่ยวทั้ง 4 ชุดการทดลอง มีการสะสมแมงกานีสในส่วนใต้ดินมากกว่าส่วนเหนือดิน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Mulugisi และคณะ (2009) ศึกษาการดูดดึงแมงกานีส ในบ่อกักเก็บกาก

แร่ทองคำเมืองลิมโปโป ประเทศแอฟริกาใต้ ด้วยหญ้าท้องถิ่น 5 สายพันธุ์ ในบ่อกักเก็บกากแร่ทองคำ เป็นระยะเวลา 6 เดือน ผลการศึกษา พบว่า หญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) มีการสะสมแมงกานีสในส่วนใต้ดินได้เท่ากับ 123 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

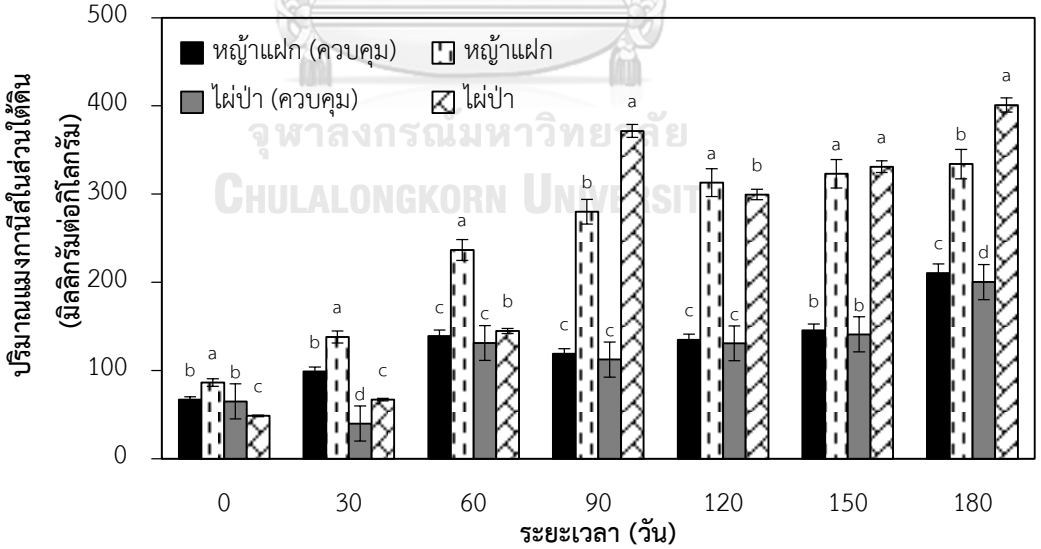
ปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้ดิน (ราก) ของหญ้าแฝกและไผ่ป่า ที่ปลูกในโรงเรือน (Ex-situ) ที่ช่วงระยะเวลาการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน พบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมของพืชทั้ง 6 ชุดการทดลองในส่วนเหนือดิน (ดังรูปที่ 4.33) ในวันที่ 180 พบว่า พืชมีการดูดดึงและสะสมแมงกานีสทั้ง 6 ชุดการทดลองและค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยหญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์มีการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือดินได้สูงที่สุด รองลงมาคือ แฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี > ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี > หญ้าแฝก (ควบคุม) > ไผ่ป่า (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 308.90 > 256.26 > 180.12 > 172.82 > 114.70 และ 110.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง ส่วนปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสทั้งหมดในส่วนใต้ดิน (ราก) ของหญ้าแฝกและไผ่ป่า (ดังรูปที่ 4.34) พบว่า ในช่วงแรกของการทดลอง 0-60 วัน หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์มีความสามารถในการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในส่วนใต้ดินได้ดี และเมื่อเข้าสู่วันที่ 90-180 วัน หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีความสามารถในการดูดดึงและสะสมแมงกานีสได้สูงที่สุด ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และเมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมของพืชทั้ง 6 ชุดการทดลอง ในวันที่ 180 พบว่า การดูดดึงแมงกานีสของพืชทดลองทั้ง 6 ชุดการทดลองค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยหญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในส่วนใต้ดินได้สูงที่สุด รองลงมาคือ หญ้าแฝก (ควบคุม) > ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี > หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > ไผ่ป่า (ควบคุม) > ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ มีค่าเท่ากับ 531.88 > 456.78 > 416.51 > 354.53 > 300.01 และ 281.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Segura-Muñoz (2006) ทำการศึกษาโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม แมงกานีส และปรอท ที่สะสมในส่วนต่างๆ ของอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ที่มีการฝังกลบขยะ และบริเวณระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลในประเทศบราซิล พบว่า รากอ้อยมีปริมาณการสะสมโลหะหนักมากที่สุด โดยมีการสะสมแมงกานีสได้เท่ากับ 561.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อีกทั้งการศึกษาของ Ruangkhum (2007) และ Sampanpanish และคณะ (2008) ที่ได้ทำการศึกษาผลของฟอสฟอรัสในปุ๋ยต่อแคดเมียมและสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ในดิน รวมไปถึงการสะสมในอ้อย โดยได้ทำการศึกษาในพื้นที่จริงที่มีการเติมปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-8 ผลการศึกษา พบว่า ปริมาณความเข้มข้น

ของแคดเมียมและสังกะสีในดินมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ในดินและอ้อยสูงขึ้น



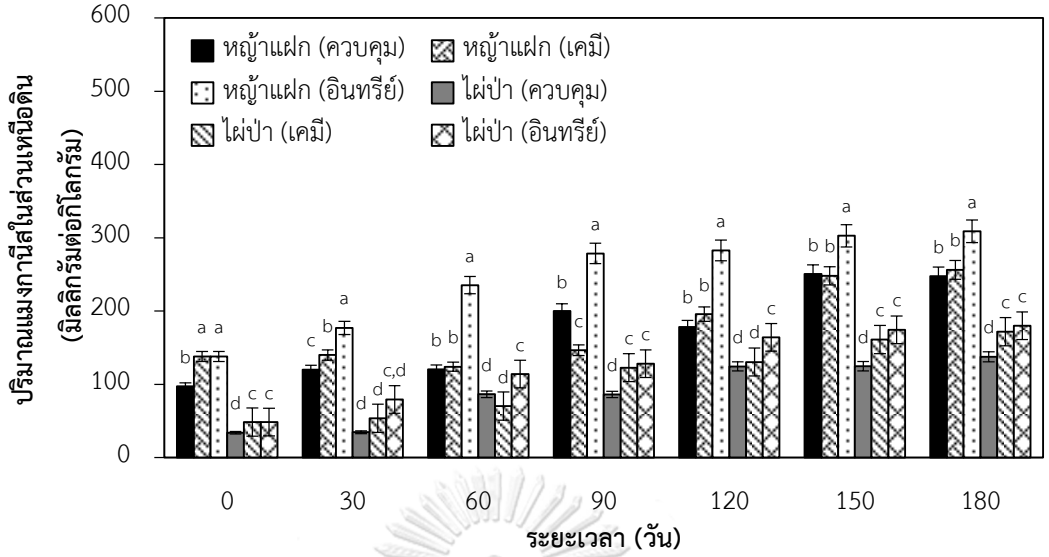
รูปที่ 4.32 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



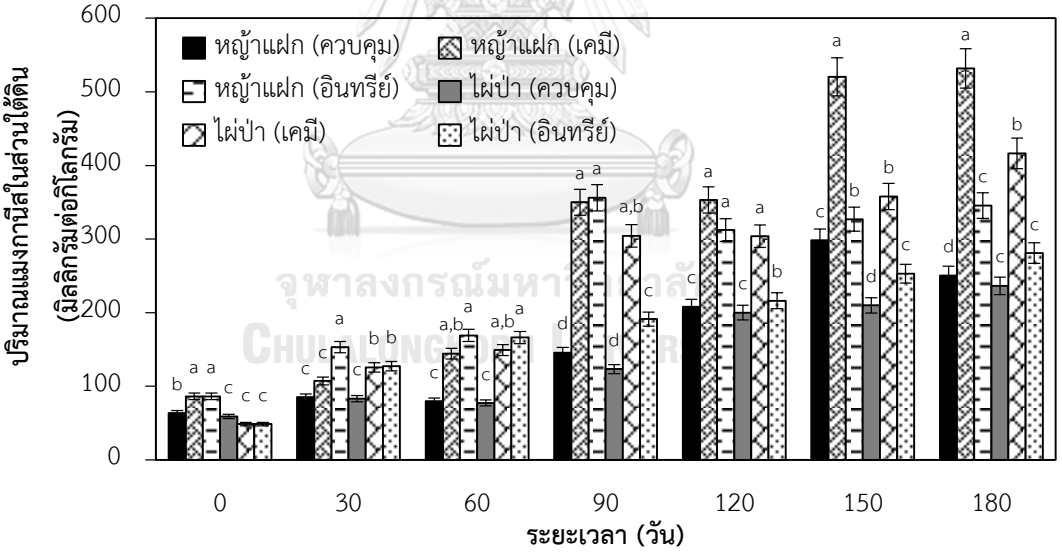
รูปที่ 4.33 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.34 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

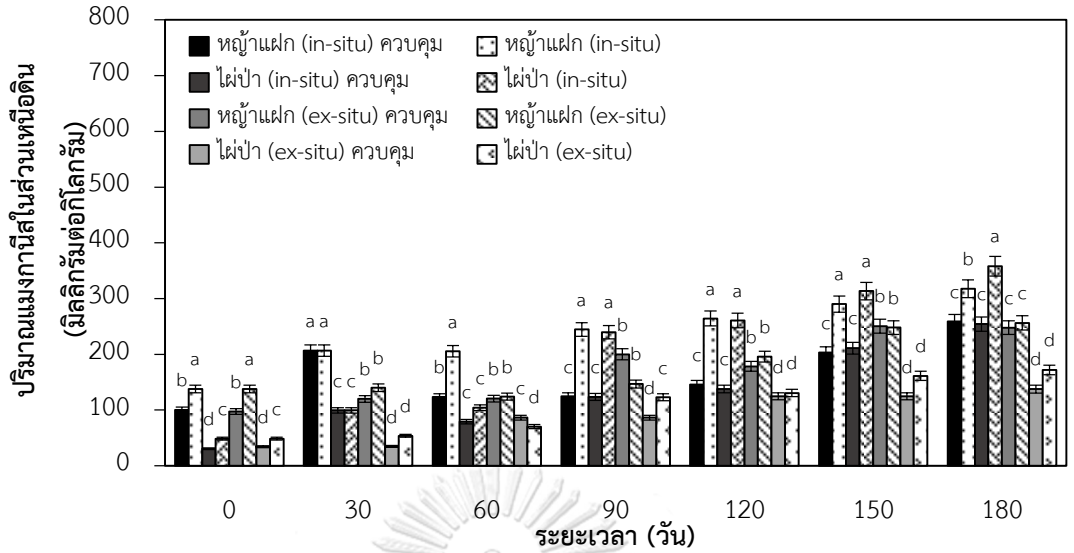


รูปที่ 4.35 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

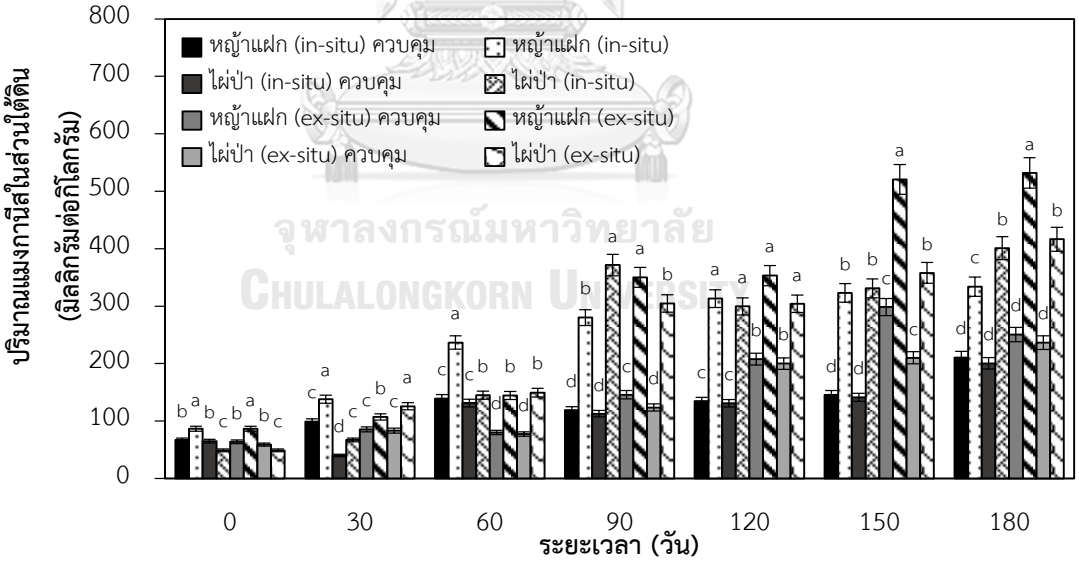
3) เปรียบเทียบผลของการเติมปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสทั้งหมดของหญ้าแฝกและไผ่ป่าชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการเติมปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้ดิน (ราก) ของหญ้าแฝกและไผ่ป่า ที่ปลูกในแปลงทดลอง (In-situ) และในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่ช่วงระยะเวลาของการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน พบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูในส่วนเหนือดิน (ดังรูปที่ 4.35) และส่วนใต้ดิน (ราก) (ดังรูปที่ 4.36) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ได้แก่ 1) หญ้าแฝก (ควบคุม) 2) หญ้าแฝก 3) ไผ่ป่า (ควบคุม) และ 4) ไผ่ป่า มีค่าการสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือดินเท่ากับ 258.78, 317.86, 254.33 และ 358.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และส่วนใต้ดินเท่ากับ 210.55, 334.03, 200.36 และ 401.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ได้แก่ 1) หญ้าแฝก-เคมี (ควบคุม) 2) หญ้าแฝก-เคมี 3) ไผ่ป่า-เคมี (ควบคุม) และ 4) ไผ่ป่า-เคมี มีการสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือดินเท่ากับ 250.50, 256.26, 236.55 และ 171.82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และส่วนใต้ดินเท่ากับ 250.56, 531.88, 236.55 และ 416.51 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมแมงกานีสของพืชทดลองในส่วนเหนือดินของชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ในวันที่ 180 พบว่า ค่าของการสะสมแมงกานีสมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยพบว่า ไผ่ป่าชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง มีความสามารถในดูดดึงแมงกานีสได้สูงที่สุด รองลงมา หญ้าแฝกชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง > หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี > ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีค่าเท่ากับ 358.06 > 317.86 > 256.26 > 171.82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับการเปรียบเทียบการสะสมแมงกานีสของพืชทดลองในส่วนใต้ดินของชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ในวันที่ 180 พบว่า การดูดดึงและสะสมแมงกานีสของพืชทดลองทั้ง 4 ชุดการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยพบว่า หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีความสามารถในดูดดึงแมงกานีสได้สูงที่สุด รองลงมา ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี > หญ้าแฝกชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง > ไผ่ป่าชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง มีค่าเท่ากับ 531.88 > 416.51 > 334.03 > 330.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง สอดคล้องกับการศึกษาของ Tu และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาผลของปุ๋ยเคมี (NPK) ที่มีต่อรูปแบบของโลหะ ได้แก่ ตะกั่ว และแคดเมียมในดิน พบว่าการใส่ปุ๋ยเคมีลงไปในดินอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบ (Speciation) และการใช้ประโยชน์ได้ในสิ่งมีชีวิต (Bioavailability) ของโลหะ ดังนั้นอิทธิพลของการใส่ปุ๋ยทำให้ปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงนำไปใช้ได้



รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95เปอร์เซ็นต์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

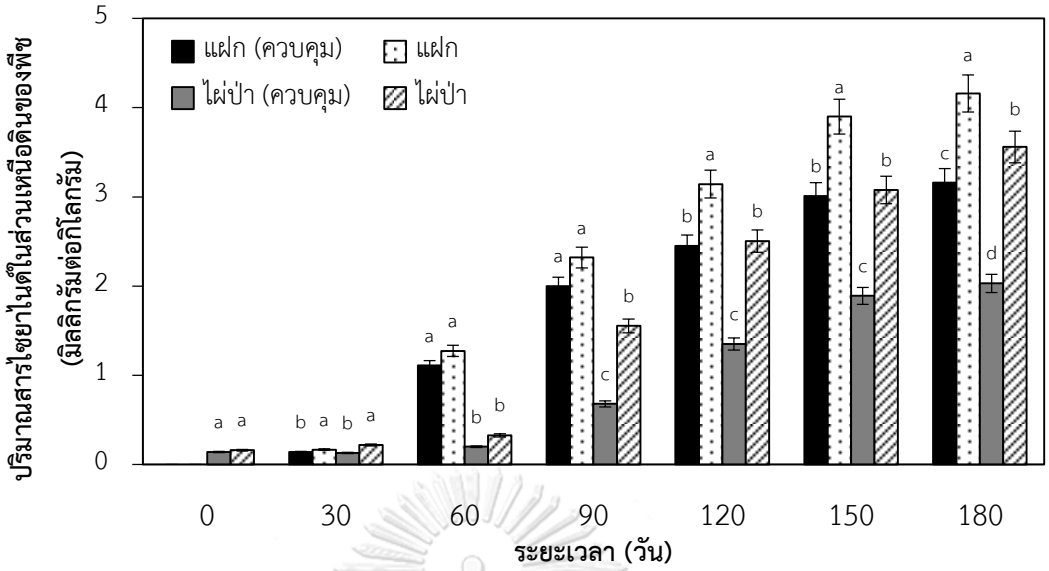
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.7.3 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่า

การศึกษาผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึงไซยาไนด์ในส่วนต่างๆ ของพืชทดลอง และจากการตรวจวิเคราะห์ค่าปริมาณไซยาไนด์ในพืชทดลอง ซึ่งแบ่งออกเป็นการปลูกในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ได้แก่ 1) หญ้าแฝก (ควบคุม) 2) หญ้าแฝก 3) ไผ่ป่า (ควบคุม) และ 4) ไผ่ป่า และการปลูกในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ได้แก่ 1) หญ้าแฝก (ควบคุม) 2) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี 3) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 4) ไผ่ป่า (ควบคุม) 5) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี และ 6) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ โดยได้ทำการศึกษาในช่วงระยะเวลาการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน ผลการศึกษาสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

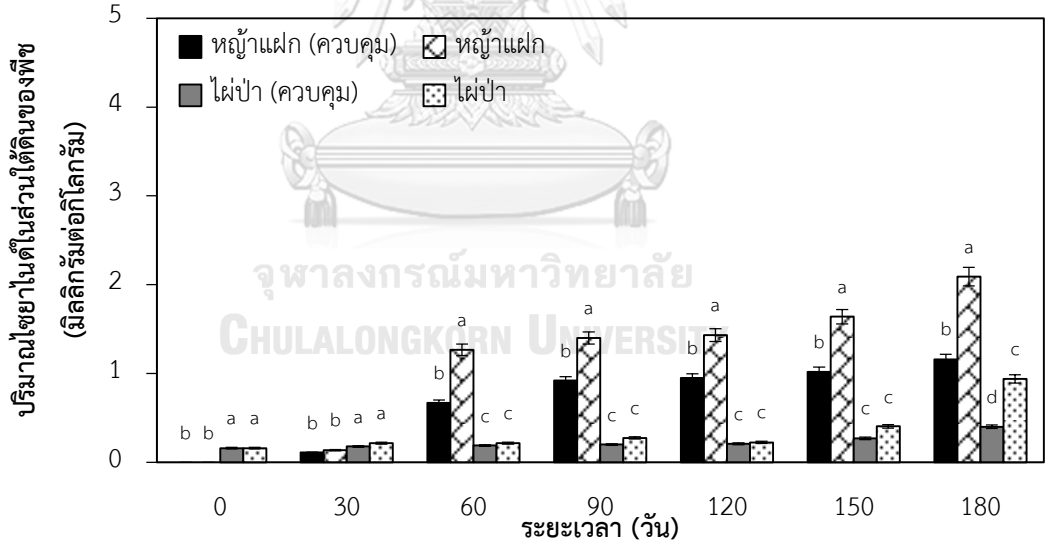
1) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

ปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้ดิน (ราก) ของหญ้าแฝกและไผ่ป่า ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ที่ช่วงระยะเวลาของการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน พบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยพบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ในส่วนเหนือดิน (ดังรูปที่ 4.37) ในวันที่เริ่มการทดลอง (0 วัน) หญ้าแฝกและไผ่ป่ามีปริมาณแมงกานีสเท่ากับ 0.00 และ 0.16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) หญ้าแฝกและไผ่ป่ามีปริมาณการดูดดึงไซยาไนด์เท่ากับ 4.16 และ 3.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่า ไผ่ป่ามีความสามารถในการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ในส่วนเหนือดินได้ดีกว่าหญ้าแฝก ส่วนการดูดดึงและสะสมยาไนด์ทั้งหมดในส่วนใต้ดิน (ราก) ของหญ้าแฝกและไผ่ป่า (ดังรูปที่ 4.38) พบว่า วันที่เริ่มการทดลอง (0 วัน) หญ้าแฝกและไผ่ป่ามีปริมาณไซยาไนด์เท่ากับ 0.00 และ 0.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) หญ้าแฝกและไผ่ป่ามีปริมาณการดูดดึงไซยาไนด์เท่ากับ 2.09 และ 0.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่า หญ้าแฝกมีความสามารถในการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ในส่วนใต้ดินได้ดีกว่าไผ่ป่า ซึ่งผลการทดลองในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Trapp และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาการกำจัดพิษของไซยาไนด์ด้วยพืชโดยข้าวฟ่าง ที่ระดับความเข้มข้นของไซยาไนด์ 1 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า สามารถกำจัดไซยาไนด์ในใบได้มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 6.94 มิลลิกรัมต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมของราก



รูปที่ 4.38 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่า ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

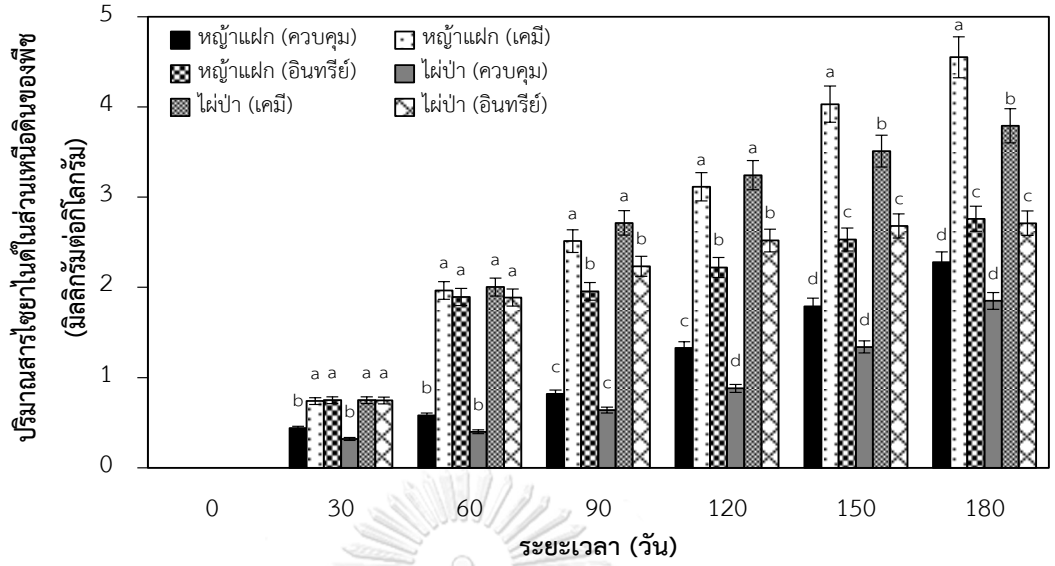
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

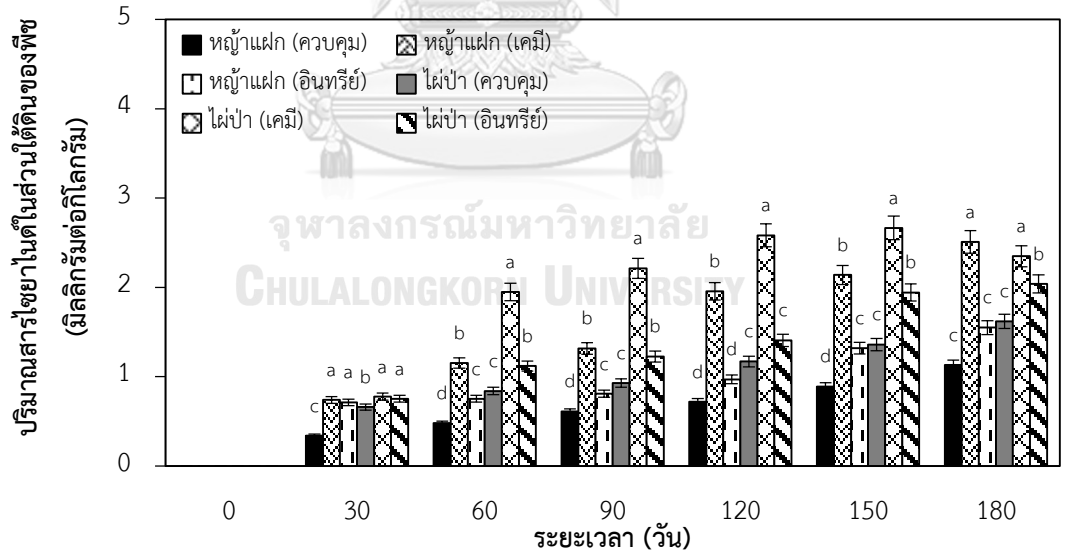
รูปที่ 4.39 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่า ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.40 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.41 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

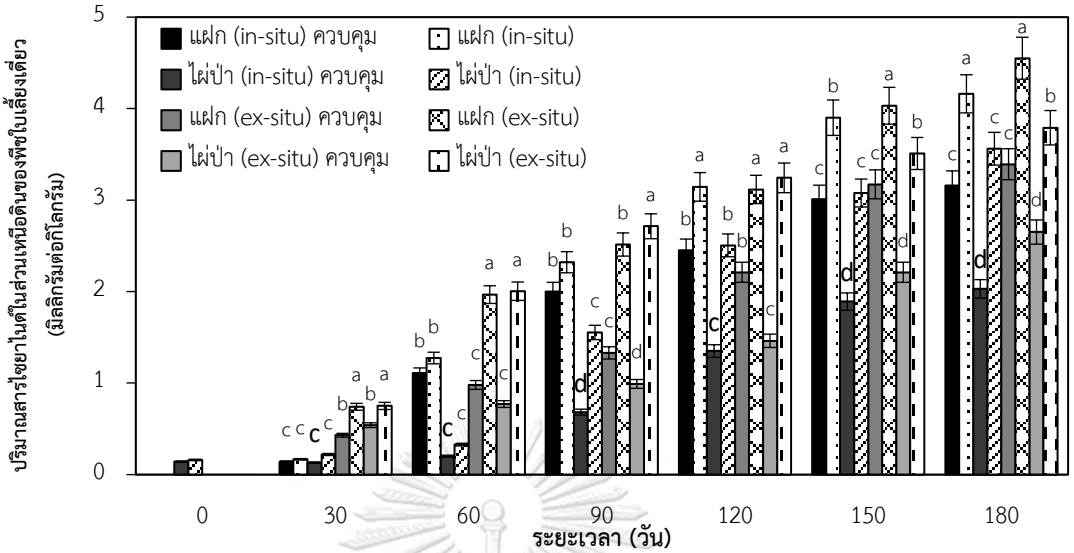
ปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้ดิน (ราก) ของหญ้าแฝกและไผ่ป่า ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่ช่วงระยะเวลาของการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน พบว่า พืชทดลองมีความสามารถในการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ในส่วนเหนือดินของพืชทั้ง 6 ชุดการทดลอง (ดังรูปที่ 4.39) ในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) พบว่า การดูดดึงไซยาไนด์ของพืชทดลองทั้ง 6 ชุดการทดลองค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยพบว่า หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการดูดดึงไซยาไนด์ได้สูงที่สุด รองลงมาคือ ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี > หญ้าแฝก (ควบคุม) > หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > ไผ่ป่า (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 4.45, 3.79, 3.39, 2.76 > 2.71 และ 2.65 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง ส่วนปริมาณการดูดดึงและสะสมยาไนด์ทั้งหมดในส่วนใต้ดิน ของหญ้าแฝกและไผ่ป่า (ดังรูปที่ 4.40) พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมของพืชทั้ง 6 ชุดการทดลอง ในวันที่ 180 พบว่าพืชมีการดูดดึงไซยาไนด์ทั้ง 6 ชุดการทดลองโดยค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ทั้งนี้พบว่า หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการดูดดึงไซยาไนด์ได้สูงที่สุด รองลงมาคือ ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี > ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > ไผ่ป่า (ควบคุม) > หญ้าแฝก (ควบคุม) > หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ มีค่าเท่ากับ 2.51, 2.35, 2.04, 1.97, 1.61 และ 1.55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดลองในครั้งนี้ยังพบว่า ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยเคมีในพืชทดลองส่งผลให้พืชมีความสามารถในการดูดดึงไซยาไนด์ได้มากกว่าชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากการเติมปุ๋ยอินทรีย์จะส่งผลให้เกิดการตรึงไซยาไนด์ให้อยู่ในกากโลหกรรม ทำให้พืชไม่สามารถดูดดึงไซยาไนด์จากกากโลหกรรมได้ ซึ่งจากการศึกษาของ Piccinin และคณะ (2007) ที่ทำการศึกษาการกำจัดไซยาไนด์ของหญ้าพื้นเมืองออสเตรเลีย และพืชทางการเกษตร 4 ชนิด ได้แก่ ต้นถั่วโคลเวอร์สีขาว (*White Clover* CV. Pretige) หญ้าออสซี่ (Wallaby Grass) หญ้าสีแดง (Red Grass) และข้าวฟ่าง (Sorghum) ในพื้นที่การทำเหมืองแร่ทองคำในระยะเวลา 5 เดือน การศึกษาค่าเฉลี่ยในการกำจัดไซยาไนด์ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อกิโลกรัมไซยาไนด์ มีค่าเท่ากับ 10.33, 0.16, 9.93 และ 1.31 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ พบว่า ต้นถั่วโคลเวอร์สีขาว (*White Clover* CV. Pretige) สามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ดีในส่วนเหนือดินมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

3) เปรียบเทียบผลของการเติมปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ทั้งหมดของหญ้าแฝกและไผ่ป่า ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการเติมปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมยาไนด์ทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้ดิน (ราก) ของหญ้าแฝกและไผ่ป่า ชุดทดลองใน

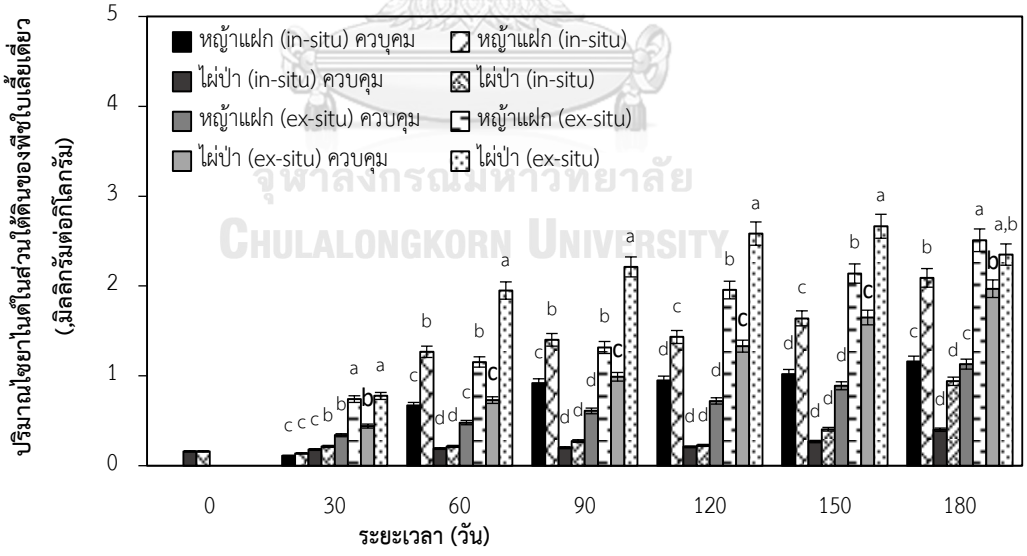
พื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่ช่วงระยะเวลาการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน พบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูในส่วนเหนือดิน (ดังรูปที่ 4.41) และส่วนใต้ดิน (ราก) (ดังรูปที่ 4.42) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ได้แก่ 1) หญ้าแฝก (ควบคุม) 2) หญ้าแฝก 3) ไผ่ป่า (ควบคุม) และ 4) ไผ่ป่า มีค่าเท่ากับ 3.16, 4.16, 2.03, 3.56 และ 1.16, 2.09, 0.40 และ 0.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ได้แก่ 1) หญ้าแฝก-เคมี (ควบคุม) 2) หญ้าแฝก-เคมี 3) ไผ่ป่า-เคมี (ควบคุม) และ 4) ไผ่ป่า-เคมี มีค่าเท่ากับ 3.39, 4.45, 2.65 และ 3.79 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 1.61, 2.51, 1.97 และ 2.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมไซยาไนด์ของพืชทดลองในส่วนเหนือดินชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ในวันที่ 180 ของการดูดดึงไซยาไนด์ พบว่า ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยพบว่า หญ้าแฝกชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีความสามารถในดูดดึงไซยาไนด์ได้สูงที่สุด รองลงมา หญ้าแฝกชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) > ไผ่ป่าชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) > ไผ่ป่าชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) มีค่าเท่ากับ 4.45 > 4.16 > 3.79 > 3.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับการเปรียบเทียบการสะสมไซยาไนด์ของพืชทดลองในส่วนใต้ดินชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่ 180 วัน พบค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยพบว่า หญ้าแฝกชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีความสามารถในดูดดึงไซยาไนด์ได้สูงที่สุด รองลงมา ไผ่ป่าชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) > หญ้าแฝกชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) > ไผ่ป่าชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) มีค่าเท่ากับ 2.51 > 2.35 > 2.09 > 0.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าชุดการทดลองโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีความสามารถในการดูดดึงไซยาไนด์ได้สูงกว่าชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Villarroel และคณะ (1993) ที่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปุ๋ยต่อการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีในพืช พบว่า มีการดูดดึงเพิ่มขึ้น 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการเติมปุ๋ยแอมโมเนีย (NH_4)

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาของนักวิจัยหลากหลายผลงานที่ศึกษาเกี่ยวกับการสะสมโลหะหนักในส่วนต่างๆ ของพืช สามารถสรุปและกล่าวได้ว่า ชนิดของพืช สายพันธุ์ และเนื้อเยื่อของพืช มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้แตกต่างกัน รวมทั้งเป็นพืชในกลุ่ม Hyperaccumulator หรือพืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักในปริมาณสูง ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้ทำให้ทราบว่า หญ้าแฝกเป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักในปริมาณสูง เนื่องจากเป็นพืชที่โตเร็ว มีมวลชีวภาพสูง มีระบบรากที่กว้าง มีวงจรชีวิตสั้น สามารถขยายพันธุ์ได้ดี สามารถเก็บเกี่ยวได้ง่าย มีความทนทานเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ปนเปื้อน และสามารถสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณที่สูง (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558) นอกจากนี้ ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ความเข้มข้นของโลหะหนัก อุณหภูมิ และความเข้มแสง ก็เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของโลหะหนักได้เช่นกัน (Adriano, 2001)



รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษ บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.8 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในส่วนต่างๆ ของพืชใบเลี้ยงคู่

4.8.1 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อปริมาณการสะสมสารหนูทั้งหมดของกระถินเทพาและกระถินยักษ์

การศึกษาผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึงสารหนูในส่วนต่างๆ ของพืชทดลอง และจากการตรวจวิเคราะห์ค่าปริมาณสารหนูในพืชทดลอง ซึ่งแบ่งออกเป็นการปลูกในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ได้แก่ 1) กระถินเทพา (ควบคุม) 2) กระถินเทพา 3) กระถินยักษ์ (ควบคุม) และ 4) กระถินยักษ์ และการปลูกในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ได้แก่ 1) กระถินเทพา (ควบคุม) 2) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี 3) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 4) กระถินยักษ์ (ควบคุม) 5) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี และ 6) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ โดยได้ทำการศึกษาในช่วงระยะเวลาการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน ผลการศึกษาสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

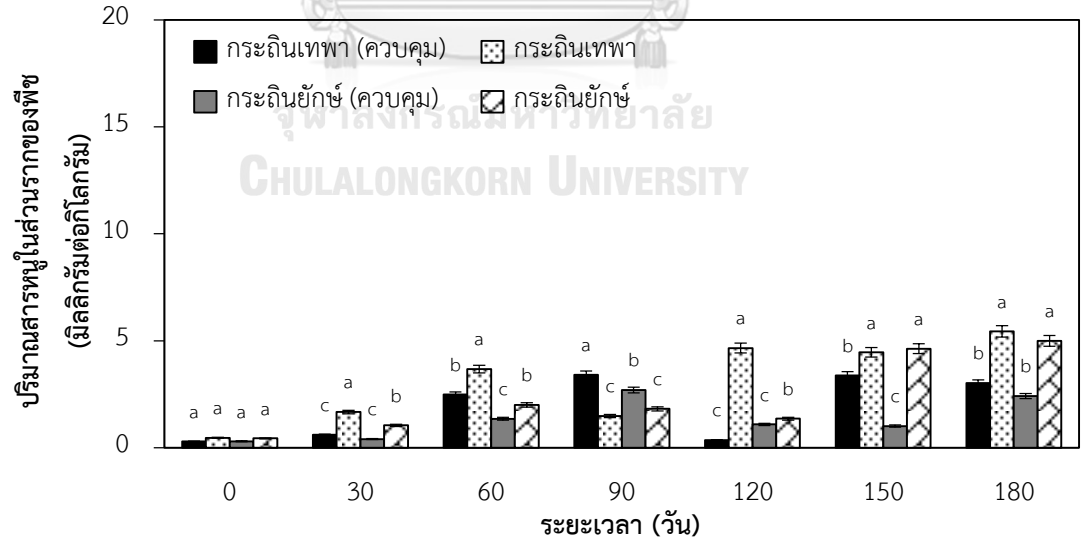
ปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูทั้งหมดในส่วนราก ลำต้น และใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ที่ช่วงระยะเวลาของการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน พบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูในส่วนรากในวันที่ 180 ของการทดลอง กระถินเทพามีการดูดดึงและสะสมสารหนูในส่วนรากได้สูงกว่ากระถินยักษ์ มีค่าเท่ากับ 5.12 และ 4.99 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยค่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (ดังรูปที่ 4.43) สำหรับการศึกษาการดูดดึงและสะสมสารหนูทั้งหมดในส่วนลำต้น (ดังรูปที่ 4.44) พบว่า กระถินเทพาและกระถินยักษ์มีการสะสมสารหนูลดลงที่ระยะ 90 วัน โดยเฉพาะกระถินยักษ์ พบว่า มีการตอบสนองต่อความเป็นพิษของสารหนู ทำให้มีดูดดึงสารหนูผ่านทางรากและเข้าสู่ลำต้นลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเป็นช่วงที่พืชเกิดกระบวนการปรับตัวต่อโลหะหนักซึ่งพืชมีกลไกในการยับยั้งธาตุพิษโดยเซลล์ภายในพืชจะช่วยลดการแสดงออกของยีนที่ช่วยในการนำธาตุโลหะเข้าสู่เซลล์โดยผ่านกระบวนการขนส่งบนเยื่อหุ้มเซลล์ หรือกักเก็บไว้ภายในแวคิวโอล (เมธา มีแต้ม, 2011) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาความเป็นพิษของพืชทดลองที่พบว่า กระถินยักษ์มีการแสดงความเป็นพิษเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ระยะ 60 วัน และ 90 วัน และหลังจากนั้นพบว่า มีการดูดดึงและสะสมสารหนูได้เพิ่มขึ้นจนถึง 180 วัน สำหรับการสะสมสารหนูในส่วนลำต้นของพืชทดลองพบว่า ค่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยกระถินเทพามีการดูดดึงสะสมสารหนูได้สูงกว่ากระถินยักษ์ มีค่าเท่ากับ 5.17 และ 4.92 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูทั้งหมดในส่วนใบ (ดังรูปที่ 4.45) พบว่า การดูดดึงและสะสมสารหนูของกระถินเทพา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

และกระถินยักษ์มีค่าลดลงที่ 90 วัน เช่นกัน และมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงวันที่ 120-180 ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพการสะสมโลหะหนักที่ต่ำในพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูง อาจมีสาเหตุมาจากความเป็นพิษของโลหะหนัก (Garcia และคณะ, 1998) อย่างไรก็ตามจากการศึกษาตลอดระยะเวลาของการทดลอง 180 วัน พบว่า ค่าการสะสมสารหนูในส่วนใบของพืชไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยเฉพาะที่ 180 วัน กระถินเทพามีค่าการสะสมสารหนูในส่วนใบสูงกว่ากระถินยักษ์ มีค่าเท่ากับ 5.14 และ 4.90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

2) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

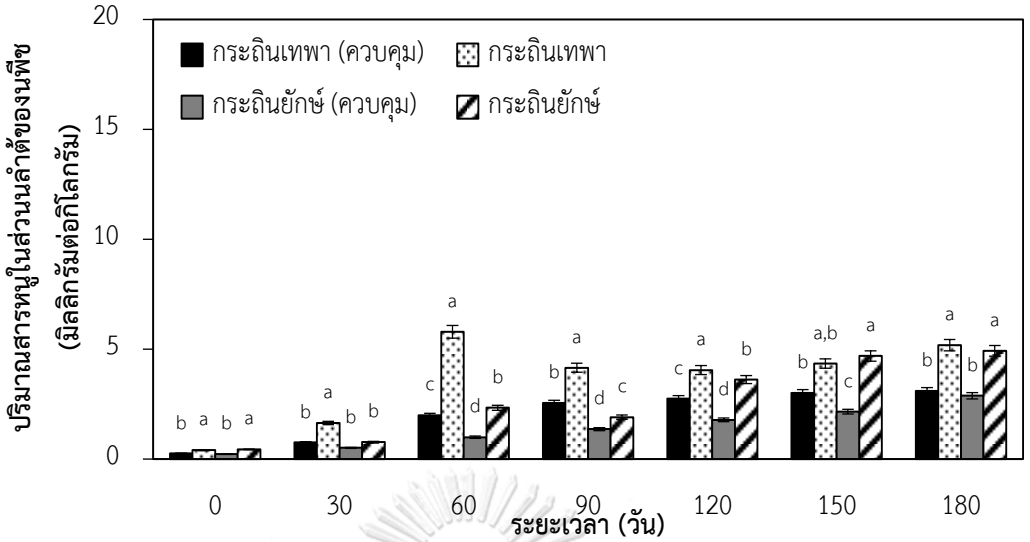
การดูดดึงและสะสมสารหนูทั้งหมดในส่วนราก ลำต้น และใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่ช่วงระยะเวลาของการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน (ดังรูปที่ 4.46) พบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูในราก ลำต้น และใบของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบการดูดดึงและสะสมสารหนูในส่วนรากของพืชทั้ง 6 ชุดการทดลอง ที่ 180 วัน พบว่า การดูดดึงและสะสมสารหนูของพืชทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยกระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการดูดดึงและสะสมสารหนูในส่วนรากได้สูงที่สุด รองลงมาคือ กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี > กระถินเทพา (ควบคุม) > กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินยักษ์ (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 7.06 > 6.13 > 5.33 > 5.30 > 4.79 > 3.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง



รูปที่ 4.44 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมสารหนูในส่วนรากของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

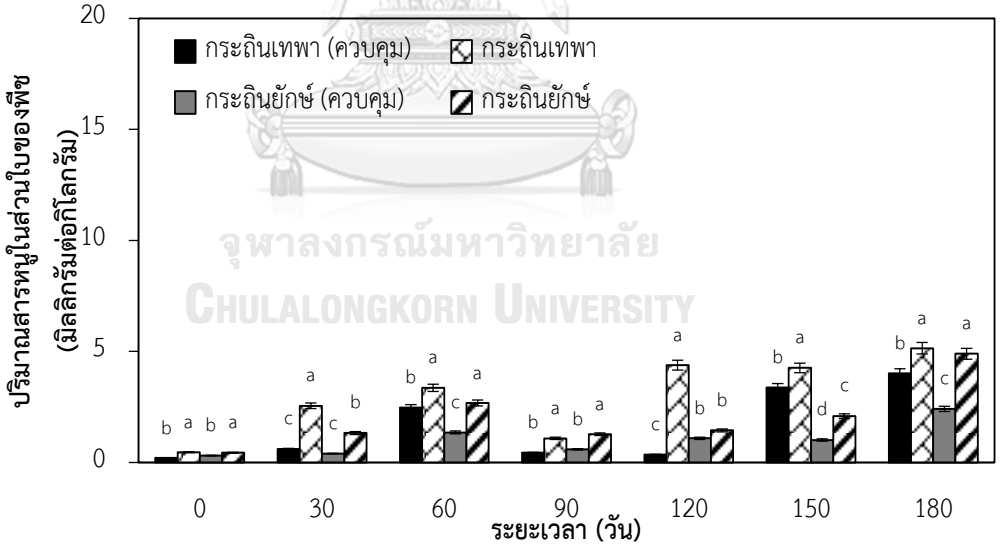
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.45 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมสารหนูในส่วนลำต้นของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

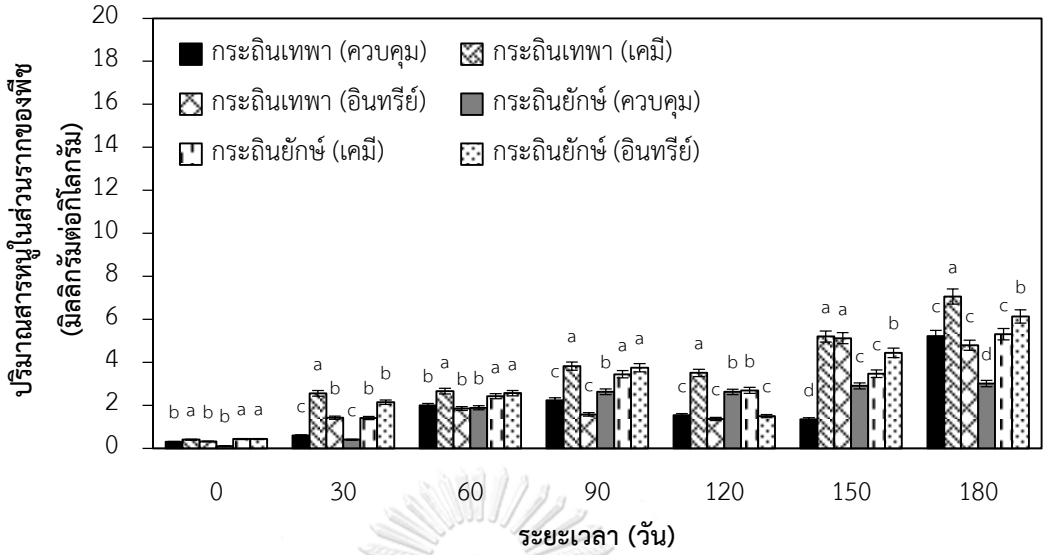
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.46 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมสารหนูในส่วนใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

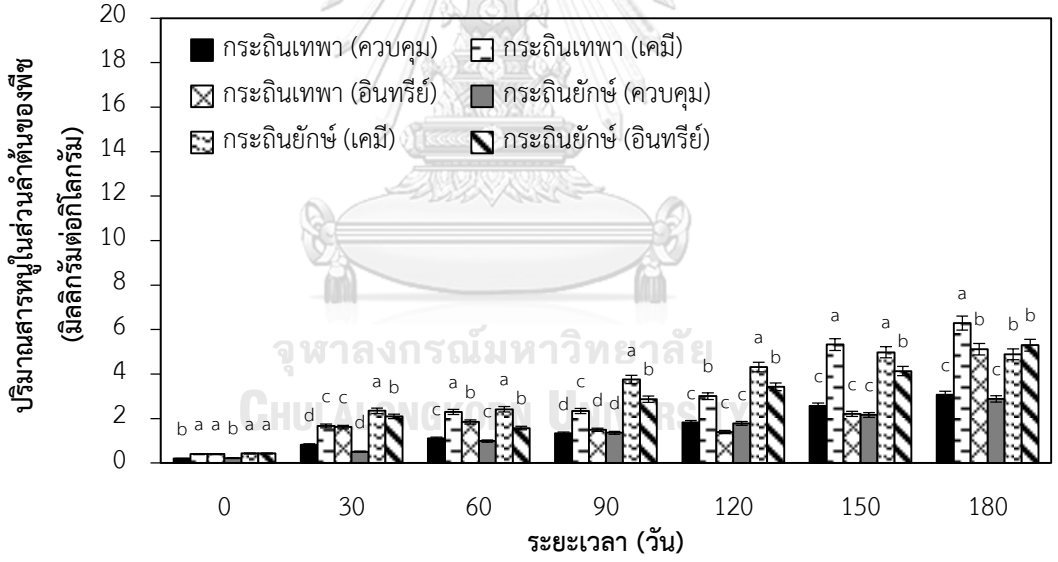


รูปที่ 4.47 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมสารหนูในส่วนรากของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Marques และคณะ (2008) ที่ได้ทำการศึกษาการสะสมสารหนู นิกเกิล และตะกั่ว โดยใช้พืช *Rubus ulmifolius* ที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนของสารหนู นิกเกิล และตะกั่ว เท่ากับ 3,078, 1,400 และ 135 มิลลิกรัมโลหะหนักต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษายัง พบว่า *Rubus ulmifolius* มีความสามารถในการสะสมสารหนูในรากสูงสุด รองลงมาคือ ลำต้น และใบได้มีค่าเท่ากับ 277-1,721, 30-133 และ 60-265 มิลลิกรัมสารหนูต่อกิโลกรัมพืช ตามลำดับ ดังนั้น *Rubus ulmifolius* สามารถนำมาใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสารหนูได้ ส่วนปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูทั้งหมดในส่วนลำต้นของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในการศึกษาครั้งนี้ (ดังรูปที่ 4.47) พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมของพืชทั้ง 6 ชุดการทดลองในวันที่ 180 พบว่า การดูดดึงและสะสมสารหนูของพืชทดลองทั้ง 6 ชุดการทดลองค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) โดยกระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการดูดดึงและสะสมสารหนูในส่วนลำต้นได้สูงที่สุด รองลงมาคือ กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินเทพา (ควบคุม) > กระถินยักษ์ (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ6.29 >5.30 > 5.12 > 4.89 > 3.07 > 3.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูทั้งหมดในส่วนใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ (ดังรูปที่ 4.48) พบว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมของพืชทั้ง 6 ชุดการทดลอง ในวันที่ 180 พบว่า ค่าการดูดดึงและสะสมสารหนูของพืชทดลองทั้ง 6 ชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) โดยกระถิน

เทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการดูดดึงและสะสมสารหนูในส่วนใบได้สูงที่สุด รองลงมาคือ กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี > กระถินเทพา (ควบคุม) > กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินยักษ์ (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 5.50 > 4.70 > 3.95 > 2.98 > 2.87 > 2.73 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้ยังพบว่า การดูดดึงและสะสมสารหนูในชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ของพืชทั้งในส่วนราก ลำต้น และใบ เนื่องมาจากการเติมปุ๋ยเคมีลงไปในชุดการทดลองทำให้สารหนูเกิดการละลายได้เพิ่มขึ้น และอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ดี ทำให้พืชดูดดึงสารหนูเข้าสู่พืชได้สูงกว่าชุดการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยอินทรีย์ซึ่งทำให้เกิดการตรึงสารหนูให้อยู่กากโลหกรรมและอยู่ในรูปที่เสถียร ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Watchara และคณะ (2008) ศึกษาหาวิธีบำบัดสารหนูปนเปื้อนในดิน บริเวณเหมืองดีบุกเก่า อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช โดยการปลูกดาวเรืองนักเก็ต (Nugget marigold) ผลการศึกษาพบว่า รากมีการสะสมสูงสุดเท่ากับ 720 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมในดินที่มีสารหนูเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และยังพบว่า การเติมปุ๋ยฟอสเฟตยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดดึงสารหนูเพิ่มขึ้นด้วย

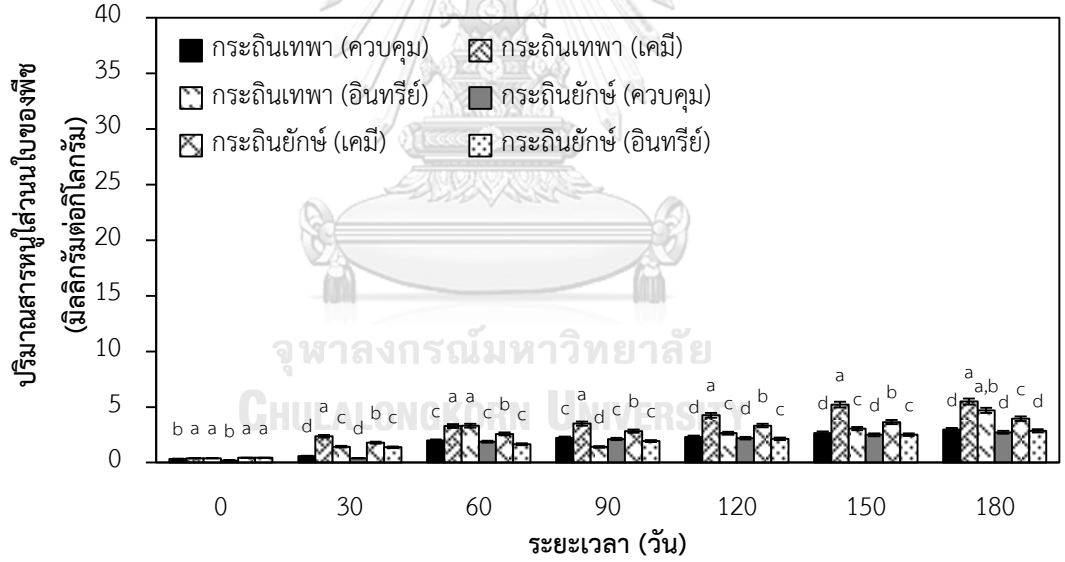


รูปที่ 4.48 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมสารหนูในส่วนลำต้นของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

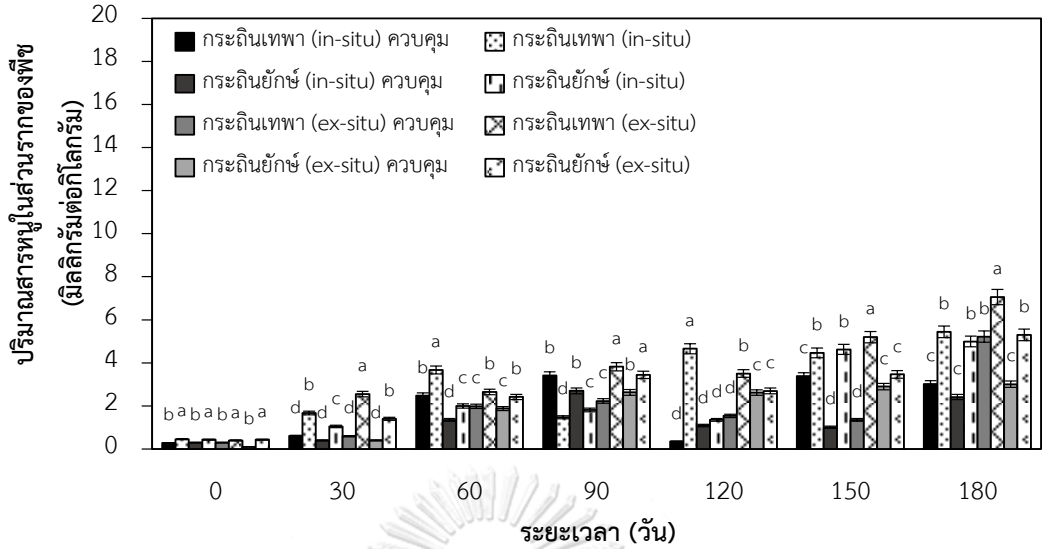
3) เปรียบเทียบผลของการเติมปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูทั้งหมดของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการเติมปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูทั้งหมดในส่วนราก ลำต้น และใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ที่ปลูกในแปลงทดลอง (In-situ) และที่ปลูกในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ตลอดระยะเวลาของการทดลอง 0-180 วัน พบว่าปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูทั้งหมดในส่วนราก (ดังรูปที่ 4.49) ลำต้น (ดังรูปที่ 4.50) และใบ (ดังรูปที่ 4.51) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ได้แก่ 1) กระถินเทพา (ควบคุม) 2) กระถินเทพา 3) กระถินยักษ์ (ควบคุม) และ 4) กระถินยักษ์ มีการสะสมสารหนูในส่วนรากเท่ากับ 3.02, 5.12, 2.41 และ 4.99 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีการสะสมสารหนูในส่วนลำต้นเท่ากับ 3.10, 5.17, 2.88 และ 4.92 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีปริมาณการสะสมสารหนูในส่วนใบเท่ากับ 4.02, 5.14, 2.41 และ 4.90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ



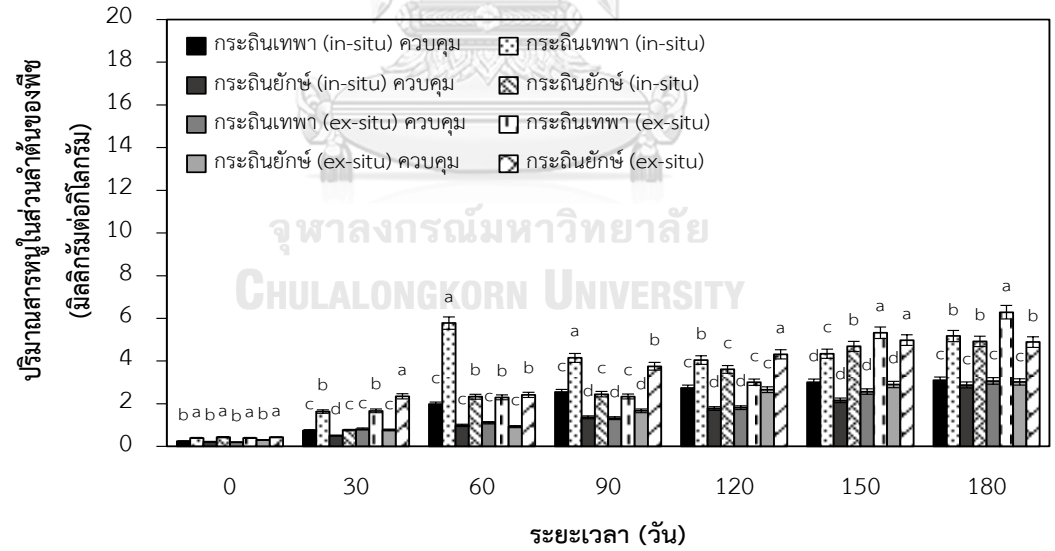
รูปที่ 4.49 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมสารหนูในส่วนใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.50 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมสารหนูในส่วนรากของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

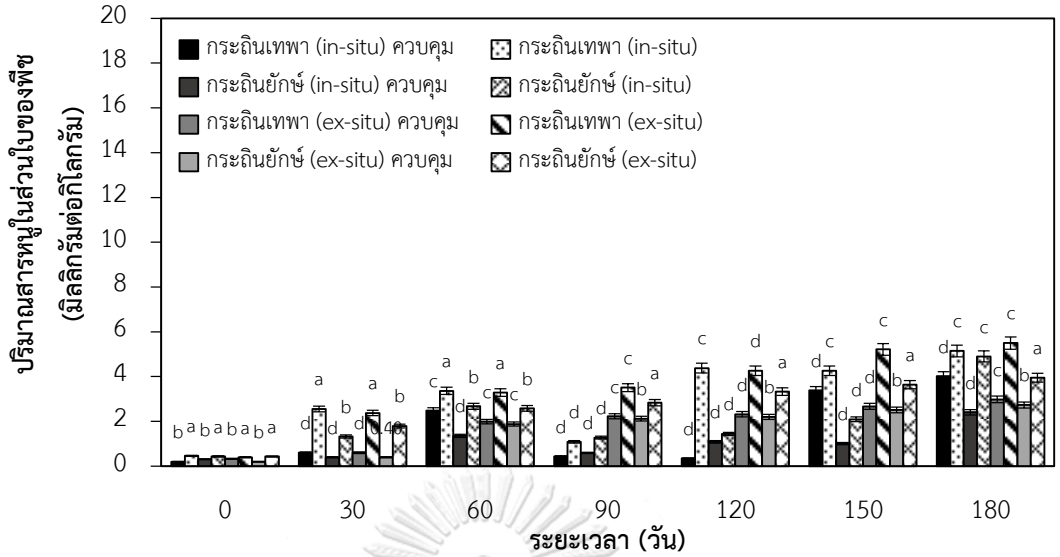
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.51 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมสารหนูในส่วนลำต้นของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.52 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมสารหนูในส่วนใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

สำหรับชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ได้แก่ 1) กระถินเทพา-เคมี (ควบคุม) 2) กระถินเทพา-เคมี 3) กระถินยักษ์-เคมี (ควบคุม) และ 4) กระถินยักษ์-เคมี มีการสะสมสารหนูในส่วนรากเท่ากับ 5.22, 7.06, 3.01 และ 5.30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีการสะสมสารหนูในส่วนลำต้นเท่ากับ 3.07, 6.29, 3.02 และ 4.89 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีการสะสมสารหนูในส่วนใบเท่ากับ 5.22, 5.50, 8.97, 13.66 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง และเมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมสารหนูในรากของพืชทดลองของชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่ 180 วัน พบว่า ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยพบว่ากระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีความสามารถในดูดดึงสารหนูในรากได้สูงที่สุด รองลงมา กระถินยักษ์ในชุดทดลองที่ปลูกในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) > กระถินเทพาชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) > กระถินยักษ์ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)มีค่าเท่ากับ 7.06 > 5.30 > 5.12 > 4.99 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมสารหนูในส่วนลำต้นชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ในวันที่ 180 พบว่า ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยพบว่า กระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีความสามารถในดูดดึงสารหนูได้สูงที่สุด รองลงมา กระถินเทพาชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) > กระถินยักษ์ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) > กระถินยักษ์ชุด

ทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีค่าการสะสมสารหนูในลำต้นเท่ากับ 6.29 > 5.17 > 4.92 > 4.89 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนการสะสมสารหนูในส่วนใบเมื่อทำการเปรียบเทียบในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ในวันที่ 180 พบว่า ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยพบว่า กระถินยักษ์ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีความสามารถในดูดดึงสารหนูได้สูงที่สุด รองลงมา กระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) > กระถินเทพาชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) > กระถินยักษ์ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) โดยมีค่าการสะสมสารหนูในใบเท่ากับ 13.66 > 5.50 > 5.14 > 4.90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

4.8.2 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสของกระถินเทพาและกระถินยักษ์

ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึงแมงกานีสในส่วนต่างๆ ของพืชทดลอง ซึ่งจากการตรวจวิเคราะห์ค่าปริมาณการสะสมแมงกานีสในพืชทดลอง ซึ่งแบ่งออกเป็นการปลูกในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ได้แก่ 1) กระถินเทพา (ควบคุม) 2) กระถินเทพา 3) กระถินยักษ์ (ควบคุม) และ 4) กระถินยักษ์ และการปลูกในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ได้แก่ 1) กระถินเทพา (ควบคุม) 2) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี 3) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 4) กระถินยักษ์ (ควบคุม) 5) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี และ 6) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ โดยได้ทำการศึกษาในช่วงระยะเวลาการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน ผลการศึกษาสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

ปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสทั้งหมดในส่วนราก ลำต้น และใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ที่ช่วงระยะเวลาของการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน (ดังรูปที่ 4.52) พบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสทั้งหมดในส่วนราก ลำต้น และใบมีแนวโน้มของการดูดดึงและสะสมแมงกานีสเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่า ส่วนรากพืชในวันที่เริ่มการทดลอง (0 วัน) กระถินเทพาและกระถินยักษ์มีปริมาณแมงกานีสสะสมเท่ากับ 35.48 และ 37.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) กระถินเทพาและกระถินยักษ์มีปริมาณการดูดดึงแมงกานีสเท่ากับ 145.81 และ 142.22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยพบว่า ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Juarez-Santillan และคณะ (2010) ที่ได้ทำการศึกษาการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในพื้นที่เหมืองแร่ Hidalgo ประเทศเม็กซิโก ด้วยการใช้ผักโขมชายา (*Cnidoscolus multilobus*) ผลการศึกษาพบว่า ส่วนรากของผักโขมชายามีการสะสมของแมงกานีสสูงสุดเท่ากับ 1,055.80 มิลลิกรัมแมงกานีสต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง นอกจากนี้ผลการศึกษายังแสดงให้

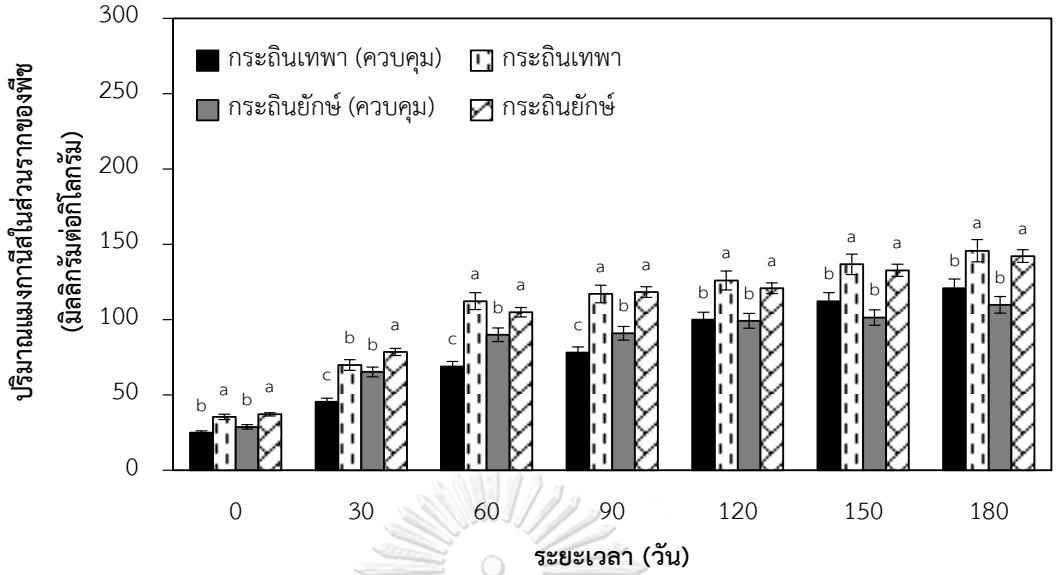
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เห็นว่า ผักโขมชายาเป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมแมงกานีสได้มากที่สุด และสามารถช่วยลดปริมาณแมงกานีสในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนแมงกานีสในปริมาณที่สูงได้ อย่างไรก็ตามการศึกษาในครั้งนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบการดูดดึงและสะสมแมงกานีสของพืชทั้ง 2 ชุดการทดลอง ในวันที่ 180 พบว่า กระถินเทพาสามารถดูดดึงและสะสมแมงกานีสในส่วนรากได้ดีกว่ากระถินยักษ์ สำหรับในส่วนของลำต้นพืช (ดังรูปที่ 4.53) วันที่เริ่มการทดลอง (0 วัน) พบว่า กระถินเทพาและกระถินยักษ์มีการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในส่วนลำต้นเท่ากับ 37.98 และ 39.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) กระถินเทพาและกระถินยักษ์มีการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในส่วนลำต้นเท่ากับ 163.33 และ 169.99 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยพบว่า ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบการดูดดึงและสะสมแมงกานีสของพืชทั้ง 2 ชุดการทดลอง ในวันที่ 180 พบว่า กระถินยักษ์มีความสามารถในการสะสมแมงกานีสไว้ในส่วนลำต้นได้ดีกว่ากระถินเทพา สำหรับในส่วนใบของพืช (ดังรูปที่ 4.54) พบว่า วันที่เริ่มการทดลอง (0 วัน) กระถินเทพาและกระถินยักษ์มีการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในส่วนใบเท่ากับ 40.36 และ 39.74 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) กระถินเทพาและกระถินยักษ์มีการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในส่วนใบเท่ากับ 230.29 และ 163.79 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยพบว่า ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบการดูดดึงและสะสมแมงกานีสของพืชทั้ง 2 ชุดการทดลอง ในวันที่ 180 พบว่า กระถินเทพามีความสามารถในการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในส่วนใบได้ดีกว่ากระถินยักษ์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า พืชใบเลี้ยงคู่ทั้ง 4 ชุดการทดลองมีการสะสมแมงกานีสในส่วนใบมากที่สุดตลอดการทดลอง รองลงมา คือ ลำต้น และราก ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Yuan และคณะ (2006) ที่ศึกษาประสิทธิภาพการสะสมแมงกานีสของพืช *Phytolacca americana* โดยทำการทดลองในดินที่ปนเปื้อนบริเวณเมืองฮูนาน ประเทศจีน ปลูกพืชในหลุมที่ความลึก 30 เซนติเมตรมีระดับความเข้มข้นของแมงกานีส ได้แก่ 123,000, 120,850, 141,775, 93,575, 112,025, และ 115,755 มิลลิกรัมแมงกานีสต่อกิโลกรัมดิน และมีการนำตัวอย่างดินและพืชมาย่อยด้วยกรดไนตริก และไฮโดรคลอริก แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแมงกานีสทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรมิเตอร์ ผลการศึกษาพบว่า พืช *Phytolacca americana* มีความสามารถในการสะสมในใบสูงกว่าในราก มีค่าเท่ากับ 8,000 และ 544 มิลลิกรัมแมงกานีสต่อกิโลกรัมพืช ตามลำดับ

2) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

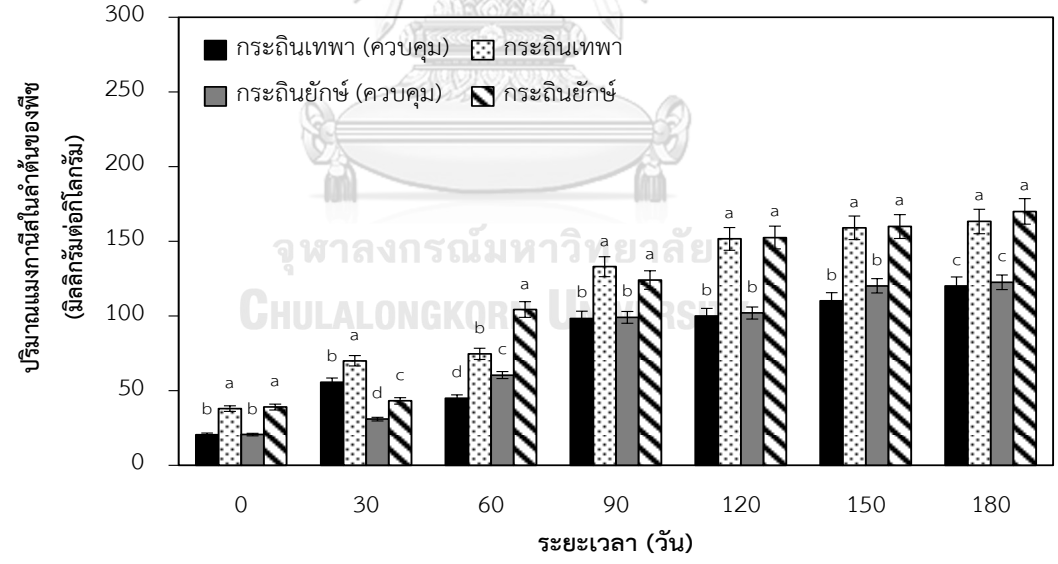
ปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสทั้งหมดในส่วนราก ลำต้น และใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ตลอดระยะเวลาของการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน (ดังรูปที่ 4.55) พบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในทุกชุดการทดลองมี

แนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมของพืชในส่วนรากทั้ง 6 ชุดการทดลอง โดยในวันที่ 180 พบว่า การดูดดึงแมงกานีสของพืชทดลองทั้ง 6 ชุดการทดลองค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยกระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการดูดดึงและสะสมแมงกานีสไว้ในส่วนรากได้สูงที่สุด รองลงมาคือ กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี > กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินเทพา (ควบคุม) > กระถินยักษ์ (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 165.95 > 160.51 > 158.45 > 148.24 > 101.01 > 98.99 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง ส่วนการดูดดึงและสะสมแมงกานีสทั้งหมดในส่วนลำต้น (ดังรูปที่ 4.56) พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมของพืชทั้ง 6 ชุดการทดลอง ในวันที่ 180 พบว่า การดูดดึงแมงกานีสของพืชทดลองทั้ง 4 ชุดการทดลองค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยกระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในส่วนลำต้นได้สูงที่สุด รองลงมาคือ กระถินเทพา (ควบคุม) > กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี > กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินยักษ์ (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 175.62 > 120.45 > 78.52 > 77.52 > 73.85 > 67.80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง สำหรับการดูดดึงและสะสมแมงกานีสทั้งหมดในส่วนใบ (ดังรูปที่ 4.57) พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมของพืชทั้ง 6 ชุดการทดลอง โดยในวันที่ 180 พบว่า การดูดดึงแมงกานีสของพืชทดลองทั้ง 6 ชุดการทดลองค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยกระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในส่วนใบได้สูงที่สุด รองลงมาคือ กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี > กระถินยักษ์ (ควบคุม) > กระถินเทพา (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 209.67 > 190.09 > 169.85 > 155.14 > 120.04 > 100.90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า พืชใบเลี้ยงคู่ทั้ง 6 ชุดการทดลองมีการสะสมแมงกานีสในส่วนใบมากที่สุดตลอดการทดลอง รองลงมา คือ ลำต้น และราก ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Qingju และ Changsheng (2015) ศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักในดินและพืชบริเวณพื้นที่เหมืองแมงกานีส เมืองฉงชิ่ง ประเทศจีน ทำการศึกษาพืชและดินจาก 5 จุดของพื้นที่และทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ Mn, Cd, Cu, Pb และ Zn โดยใช้พืชทั้งหมด 37 สปีชีส์ (species) จากการศึกษาพบว่า *Miscanthus sinensis* และ *Stenoloma chusanum* มีความสามารถในการสะสมแมงกานีสในส่วนใบสูงถึง 323-8,434 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม



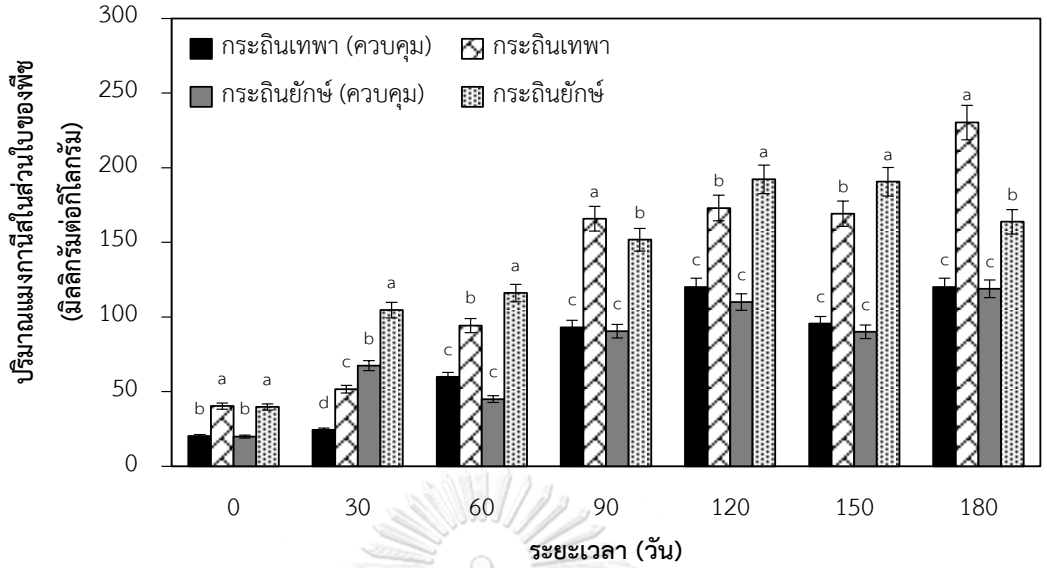
รูปที่ 4.53 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนรากของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



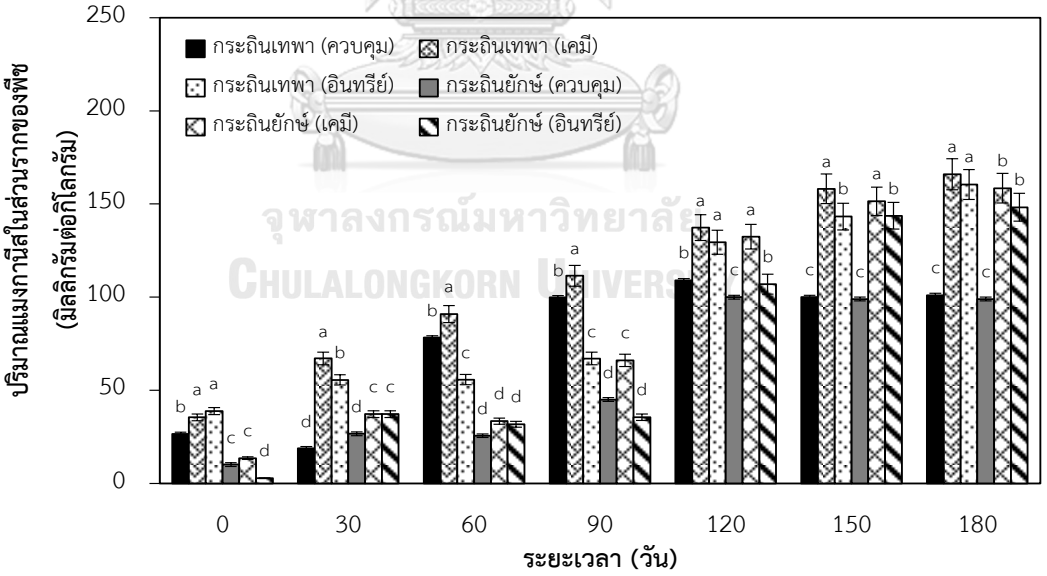
รูปที่ 4.54 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนลำต้นของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



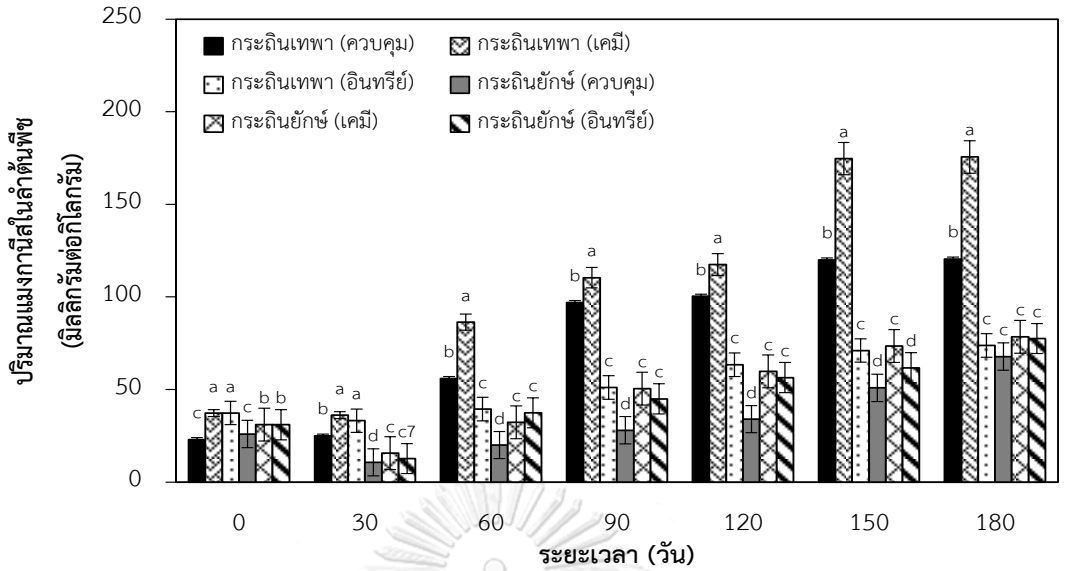
รูปที่ 4.55 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



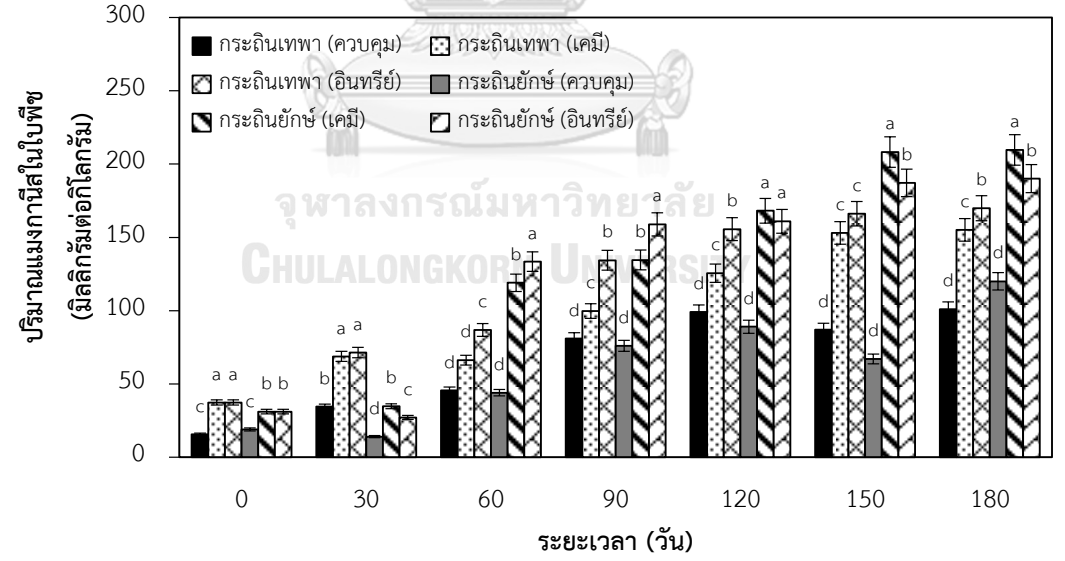
รูปที่ 4.56 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนรากของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.57 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนลำต้นของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.58 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมแมงกานีสในส่วนใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

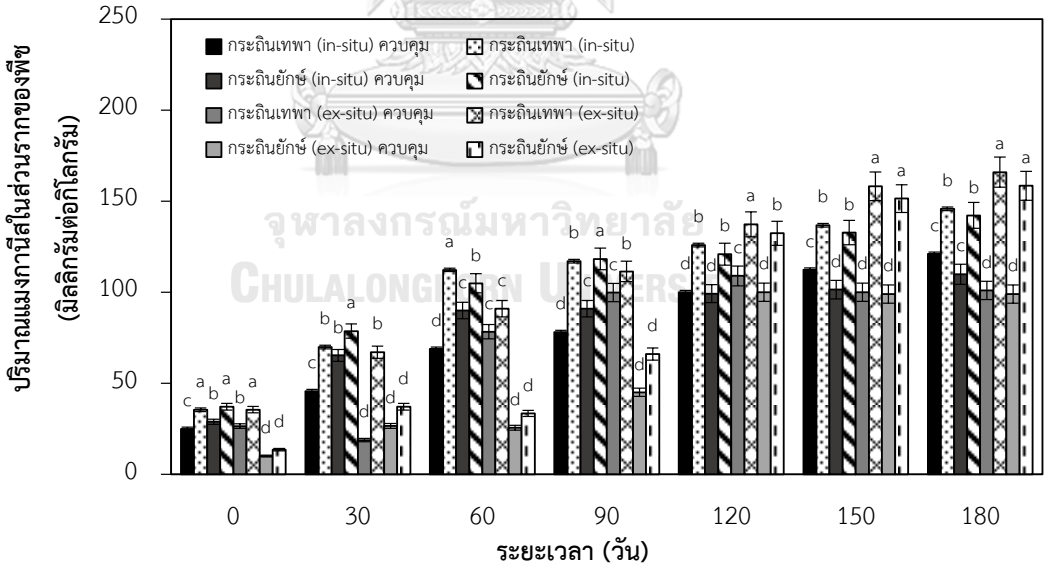
3) เปรียบเทียบผลของการเติมปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสทั้งหมดของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

การเปรียบเทียบผลของการเติมปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสทั้งหมดในส่วนราก ลำต้น และใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ที่ปลูกในแปลงทดลอง (In-situ) และปลูกในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่ช่วงระยะเวลาของการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน พบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูทั้งหมดในส่วนราก (ดังรูปที่ 4.58) ลำต้น (ดังรูปที่ 4.59) และใบ (ดังรูปที่ 4.60) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ได้แก่ 1) กระถินเทพา (ควบคุม) 2) กระถินเทพา 3) กระถินยักษ์ (ควบคุม) และ 4) กระถินยักษ์ มีค่าการสะสมสารหนูในส่วนรากเท่ากับ 120.99, 145.81, 109.88 และ 142.22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีการสะสมสารหนูในส่วนลำต้นเท่ากับ 120.11, 163.33, 122.55 และ 169.99 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีการสะสมสารหนูในส่วนใบเท่ากับ 120.00, 230.29, 118.90 และ 163.79 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ได้แก่ 1) กระถินเทพา-เคมี (ควบคุม) 2) กระถินเทพา-เคมี 3) กระถินยักษ์-เคมี (ควบคุม) และ 4) กระถินยักษ์-เคมี มีค่าการสะสมสารหนูในส่วนรากเท่ากับ 101.00, 165.95, 98.99 และ 158.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สะสมสารหนูในส่วนลำต้นเท่ากับ 120.45, 175.62, 67.80 และ 78.52 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีการสะสมสารหนูในส่วนใบเท่ากับ 100.90, 155.14, 120.00 และ 209.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสทั้งหมดในส่วนราก ลำต้น และใบในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมของพืชทดลองในส่วนรากชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่ 180 วัน พบว่า ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยพบว่า กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีความสามารถในดูดดึงและสะสมแมงกานีสไว้ในรากได้สูงที่สุด รองลงมา กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี > กระถินยักษ์ที่ปลูกในแปลงทดลอง > กระถินเทพาที่ปลูกในแปลงทดลอง มีค่าการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในรากเท่ากับ 165.95 > 158.45 > 145.81 > 142.22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับการเปรียบเทียบการสะสมของพืชในส่วนลำต้นชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ในวันที่ 180 การดูดดึงและสะสมแมงกานีสของพืชทดลองทั้ง 4 ชุดการทดลองค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และพบว่า กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีความสามารถในดูดดึงแมงกานีสในลำต้นได้สูงที่สุด รองลงมา กระถินยักษ์ที่ปลูกในแปลงทดลอง > กระถินเทพาที่ปลูกในแปลงทดลอง > กระถินยักษ์ที่ที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีค่าการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในลำต้นเท่ากับ 175.62 > 169.99 > 163.33 > 78.52 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเปรียบเทียบการสะสมของพืชในส่วนใบชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองใน

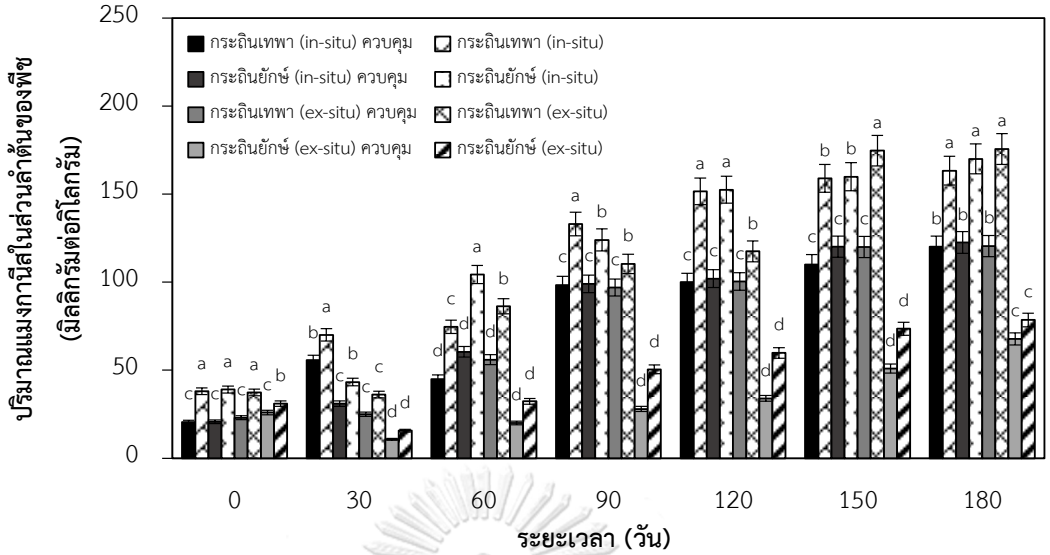
โรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ในวันที่ 180 การดูดดึงและสะสมแมงกานีสของพืชทดลองทั้ง 4 ชุดการทดลองค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) และยังพบว่า กระถินเทพาที่ปลูกในแปลงทดลอง มีความสามารถในดูดดึงแมงกานีสไว้ในใบได้สูงที่สุด รองลงมา กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี > กระถินยักษ์ที่ปลูกในแปลงทดลอง > กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีค่าการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในใบเท่ากับ 230.29 > 209.67 > 163.79 > 155.14 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง

4.8.3 ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ของกระถินเทพาและกระถินยักษ์

ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึงไซยาไนด์ในส่วนต่างๆ ของพืชทดลอง และจากการตรวจวิเคราะห์ค่าปริมาณสารหนูในพืชทดลอง ซึ่งแบ่งออกเป็นการปลูกในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ได้แก่ 1) กระถินเทพา (ควบคุม) 2) กระถินเทพา 3) กระถินยักษ์ (ควบคุม) และ 4) กระถินยักษ์ และการปลูกในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ได้แก่ 1) กระถินเทพา (ควบคุม) 2) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี 3) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 4) กระถินยักษ์ (ควบคุม) 5) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี และ 6) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ โดยได้ทำการศึกษาในช่วงระยะเวลาการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน ผลการศึกษาสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

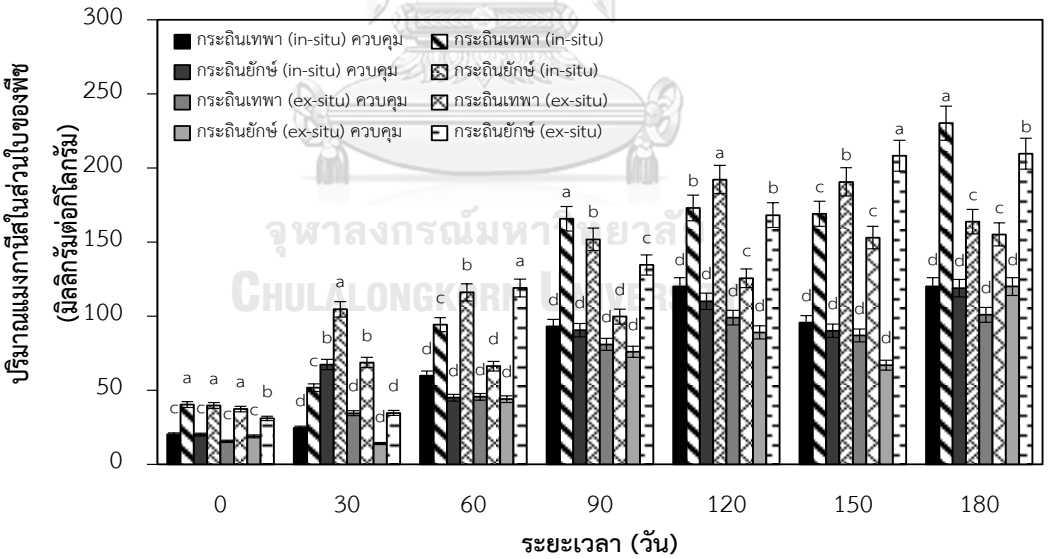


รูปที่ 4.59 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสในส่วนรากกระถินเทพาและกระถิน-ยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



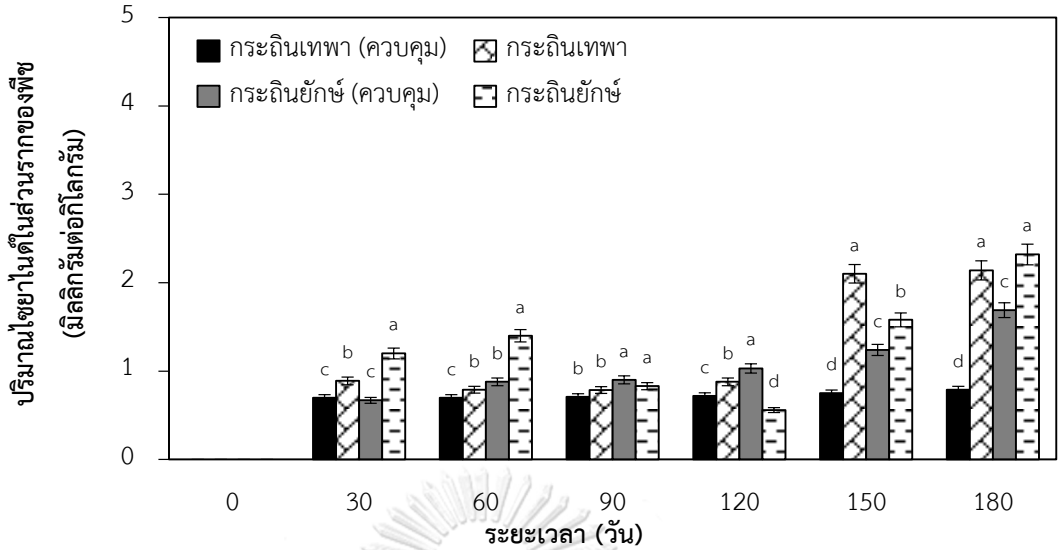
รูปที่ 4.60 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสในส่วนลำต้นกระถินเทพาและกระถิน-ยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



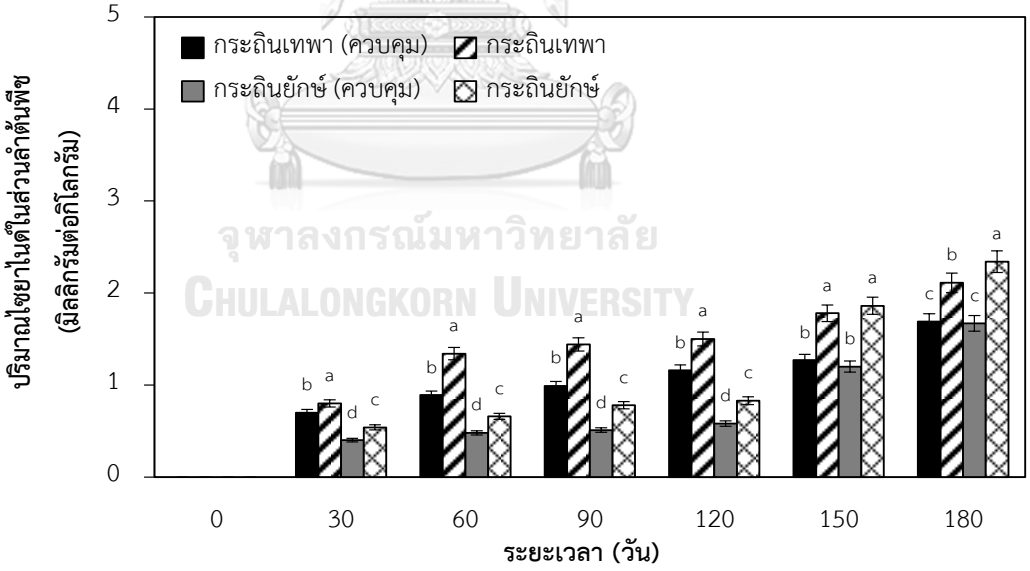
รูปที่ 4.61 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสในส่วนใบกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.62 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนรากของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.63 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนลำต้นของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

1) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

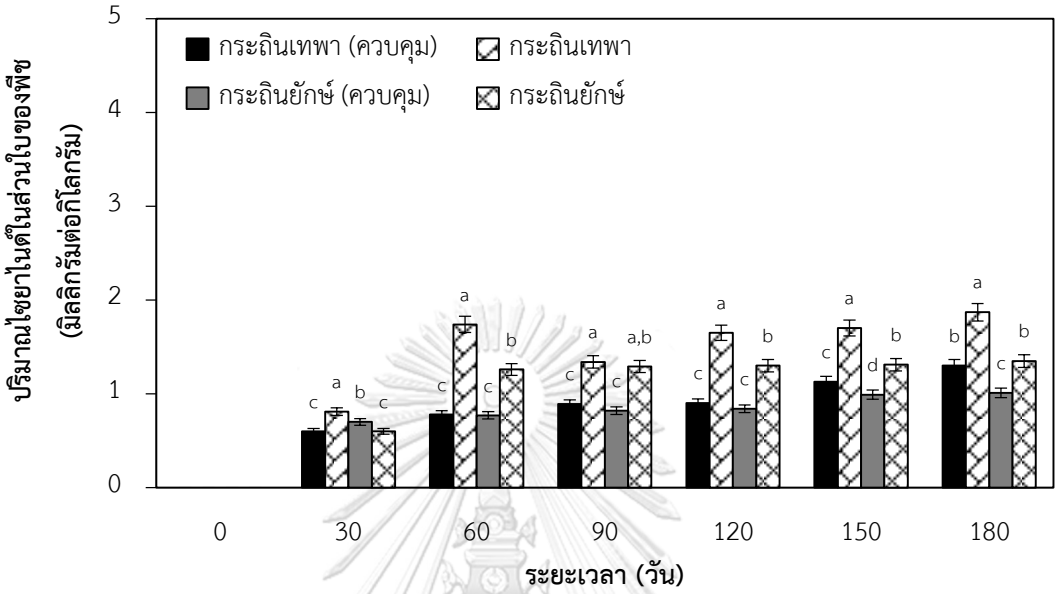
ปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ทั้งหมดในส่วนราก ลำต้น และใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ที่ช่วงระยะของเวลาของการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน พบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ในส่วนราก (ดังรูปที่ 4.61) ลำต้น (ดังรูปที่ 4.62) และใบ (ดังรูปที่ 4.63) ของพืชทดลอง โดยค่าการสะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่า วันที่เริ่มการทดลอง (0 วัน) กระถินเทพาและกระถินยักษ์ไม่พบการสะสมไซยาไนด์ทั้งในส่วนราก ลำต้น และใบของพืชทดลอง สำหรับในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) พบว่า กระถินเทพามีการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ในราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 2.14, 2.11 และ 1.87 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และสำหรับกระถินยักษ์มีการสะสมไซยาไนด์ในราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 2.32, 2.34 และ 1.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และยังพบว่า กระถินยักษ์มีการสะสมไซยาไนด์ลดลงที่ระยะ 120 วัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระถินยักษ์มีการตอบสนองต่อความเป็นพิษของไซยาไนด์ โดยไซยาไนด์เมื่อสะสมในพืชจะเข้าไปแทรกแซงกระบวนการเมทาบอลิซึม ซึ่งส่งผลให้พืชมีการสังเคราะห์แสงได้น้อย ส่งผลให้พืชชะลอหรือชะงักการเจริญเติบโตและดูดดึงแร่ธาตุที่มีอยู่ในดินได้น้อยลง (Singh และคณะ 2006) นอกจากนี้ยังพบว่า กระถินยักษ์มีความสามารถในการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์เข้าสู่ส่วนรากและลำต้นได้สูงกว่ากระถินเทพา สำหรับในส่วนใบพบว่า กระถินเทพามีการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ได้สูงกว่ากระถินยักษ์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ebel และคณะ (2007) ที่ได้ศึกษาการใช้ผักตบชวามาบำบัดไซยาไนด์ที่ปนเปื้อนในน้ำอันเกิดจากการทำเหมือง ผลการศึกษาพบว่า ภายหลังจากใช้ผักตบชวาไปแล้ว 23-32 ชั่วโมง พืชสามารถกำจัดไซยาไนด์ที่ระดับความเข้มข้น 5.8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรได้หมด และเมื่อดูการสะสมของไซยาไนด์ในส่วนต่างๆ ของผักตบชวา พบว่าไซยาไนด์มีการสะสมในส่วนใบได้มากที่สุด

2) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ทั้งหมดในส่วนราก ลำต้น และใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่ช่วงระยะเวลาของการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน พบว่า ปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ในราก ลำต้น และใบของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมในส่วนรากของพืชทดลองทั้ง 6 ชุดการทดลอง ในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) พบว่า การดูดดึงไซยาไนด์ของพืชทดลองทั้ง 6 ชุดการทดลองค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยพบว่า กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการดูดดึงไซยาไนด์ไว้ในรากได้สูงที่สุด รองลงมาคือ กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี > กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินเทพา (ควบคุม) >

กระถินยักษ์ (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 2.22 > 2.18 > 2.17 > 2.09 > 1.67 > 1.29 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง (ดังรูปที่ 4.64) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chen และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาการดูดดึงแคดเมียมด้วยข้าวสาลีที่มีการเติมธาตุฟอสฟอรัสระดับต่างๆ กัน พบว่า รากของต้นข้าวสาลีเป็นส่วนที่มีการสะสมแคดเมียมมากที่สุด ตามด้วยลำต้น เปลือกข้าว และเมล็ดข้าว ตามลำดับ สำหรับปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ทั้งหมดในส่วนลำต้น (ดังรูปที่ 4.65) พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมของพืชทั้ง 6 ชุดการทดลอง ในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) พบว่า การดูดดึงไซยาไนด์ของพืชทดลองทั้ง 6 ชุดการทดลองค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยพบว่า กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการดูดดึงไซยาไนด์ไว้ในลำต้นได้สูงที่สุด รองลงมาคือ กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี > กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินเทพา (ควบคุม) > กระถินยักษ์ (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 2.39 > 2.29 > 2.28 > 2.10 > 1.69 > 1.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยเคมีในพืชทดลองส่งผลให้พืชมีความสามารถในการดูดดึงไซยาไนด์ได้มากกว่าชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากการเติมปุ๋ยเคมีจะมีส่วนในการช่วยทำให้พืชสามารถดูดดึงไซยาไนด์จากกากโลหกรรมได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ruangkhum (2007) ที่ทำการศึกษาผลของฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีต่อการดูดดึงแคดเมียมด้วยอ้อย โดยอัตราการใส่ปุ๋ยเคมี ได้แก่ 0, 50, 100 และ 200 กิโลกรัมต่อไร่ ผลการศึกษาพบว่า มีค่าการสะสมแคดเมียมเท่ากับ 5.74, 4.04, 3.59 และ 2.46 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 6 เดือน อย่างไรก็ตามผลของการทดลองในครั้งนี้ยังพบว่า กระถินยักษ์มีความสามารถในการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ในส่วนลำต้นได้ดีกว่ากระถินเทพา ส่วนการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ทั้งหมดในส่วนใบ (ดังรูปที่ 4.66) พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบการสะสมของพืชทั้ง 6 ชุดการทดลอง ในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) พบว่า การดูดดึงไซยาไนด์ของพืชทดลองทั้ง 6 ชุดการทดลองค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยพบว่า กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการดูดดึงไซยาไนด์ไว้ในใบได้สูงที่สุด รองลงมาคือ กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินเทพา (ควบคุม) > กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี > กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ > กระถินยักษ์ (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 1.99 > 1.80 > 1.45 > 1.44 > 1.20 > 0.91 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง และจากผลการทดลองยังพบว่า ชุดการทดลองที่เติมปุ๋ยอินทรีย์ส่งผลให้เกิดการตรึงของธาตุโลหะหนักอยู่ในดิน และส่งผลให้พืชทดลองมีความสามารถในการดูดดึงไซยาไนด์ได้น้อยกว่าชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมี ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Morten และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาการกำจัดความเป็นพิษของโพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN) ด้วยต้นปอเทือง (*Salix viminalis*) โดยการตัดปักชำเป็นเวลา 6 สัปดาห์และย้ายไปใส่ขวดทดลองปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่ใส่สารอาหารที่มีระดับความเข้มข้นของโปแทสเซียมไซยาไนด์เท่ากับ 0, 0.4, 2, 8 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรไซยาไนด์ พีเอช 7.5 อยู่ในสภาวะควบคุมอุณหภูมิ 24.5±5 องศาเซลเซียส ความชื้น

สัมพัทธ์ 45±5 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีไนโตรเจนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตรไซยาไนด์มีการสะสมในส่วนลำต้นได้สูงที่สุด



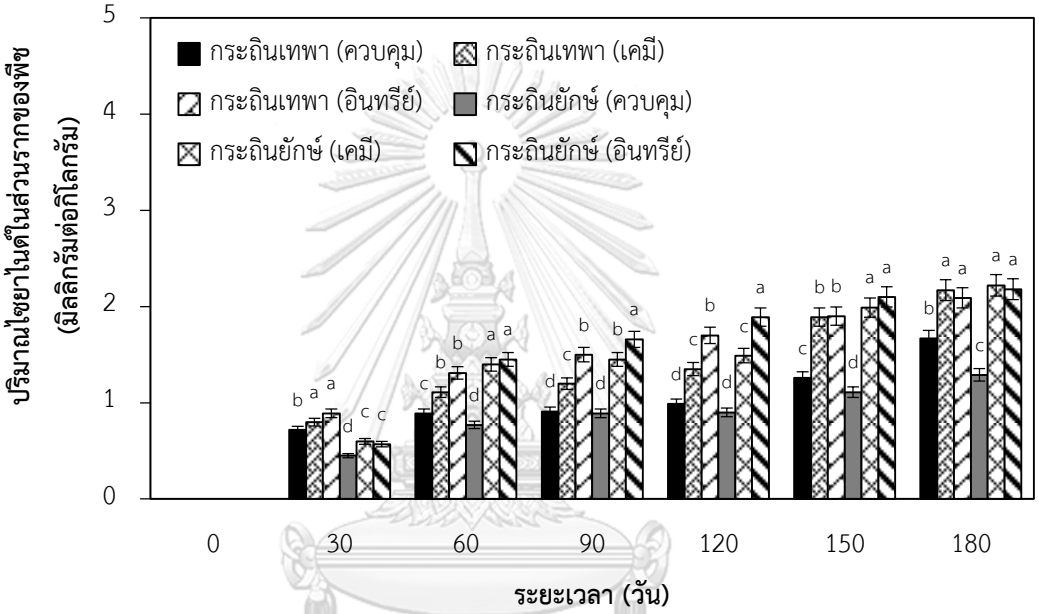
รูปที่ 4.64 ผลของปุ๋ยเคมีต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

3) เปรียบเทียบผลของการเติมปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ทั้งหมดในส่วนราก ลำต้น และใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

การเปรียบเทียบผลของการเติมปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมยาไนด์ทั้งหมดในส่วนราก ลำต้น และใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่ช่วงระยะเวลาการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน พบว่าปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูทั้งหมดในส่วนราก (ดังรูปที่ 4.67) ลำต้น (ดังรูปที่ 4.68) และใบ (ดังรูปที่ 4.69) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ได้แก่ 1) กระถินเทพา (ควบคุม) 2) กระถินเทพา 3) กระถินยักษ์ (ควบคุม) และ 4) กระถินยักษ์ พบการสะสมไซยาไนด์ในส่วนรากมีค่าเท่ากับ 0.79, 2.14, 1.69 และ 2.32 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีการสะสมไซยาไนด์ในส่วนลำต้นเท่ากับ 1.69, 2.11, 1.67 และ 2.34 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีการสะสมไซยาไนด์ในส่วนใบโดยมีค่าเท่ากับ 1.30, 1.87, 1.01 และ 1.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ได้แก่ 1) กระถินเทพา-เคมี (ควบคุม) 2) กระถินเทพา-เคมี 3) กระถินยักษ์-เคมี (ควบคุม) และ 4) กระถินยักษ์-เคมี พบว่า มีการสะสมไซยาไนด์ในส่วนรากมีค่าเท่ากับ 1.67, 2.17, 1.29 และ 2.22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีการสะสมไซยาไนด์ในส่วนลำต้นมีค่าเท่ากับ 1.69, 2.29, 1.45 และ 2.39 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและมีการสะสมไซยาไนด์ในส่วนใบมีค่าเท่ากับ 1.45, 1.99, 0.91 และ 1.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของชุดการทดลอง โดยพบว่าปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น



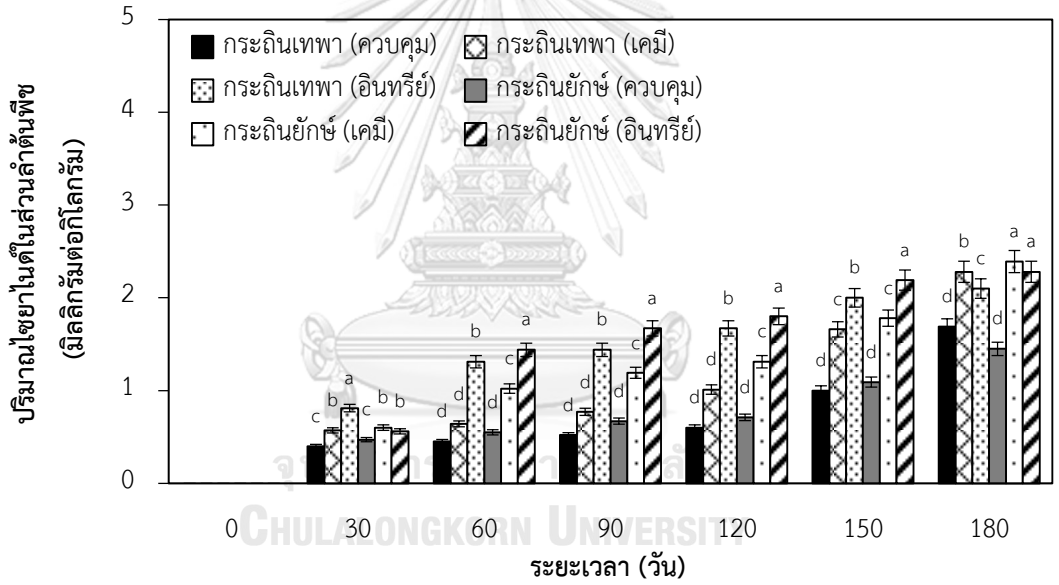
รูปที่ 4.65 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนรากของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

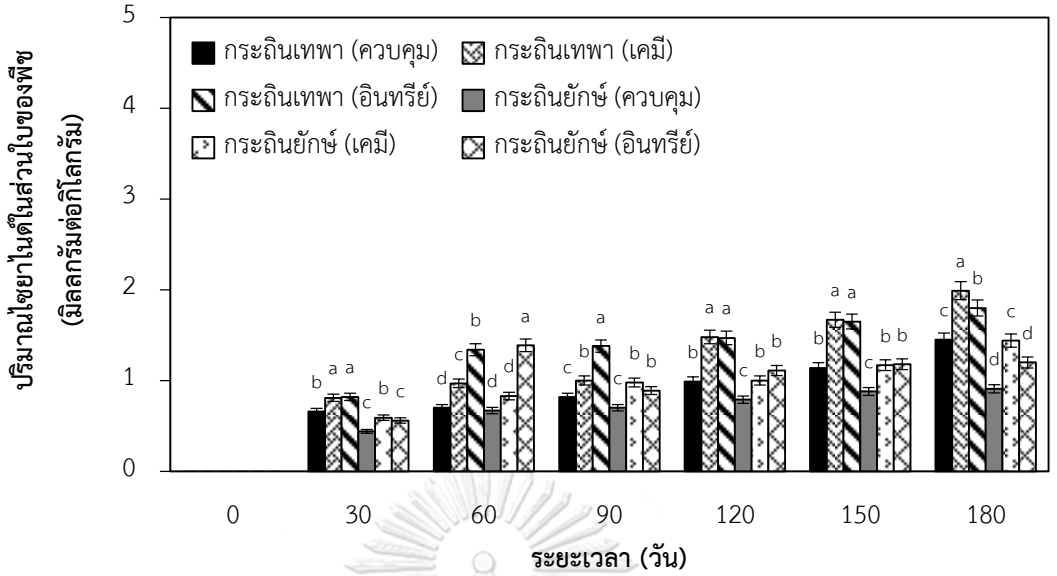
และเมื่อทำการเปรียบเทียบการดูดดึงและสะสมในส่วนรากของพืชทดลองชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ในวันที่ 180 พบว่า กระถินยักษ์ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) มีความสามารถในดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ไว้ในส่วนรากได้สูงที่สุด รองลงมา กระถินยักษ์ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) > กระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) > กระถินเทพาชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) มีค่าเท่ากับ 1.76 > 1.66 > 1.37 > 1.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับการเปรียบเทียบการดูดดึงและสะสมในส่วนลำต้นของพืชทดลองชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองใน

โรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ในวันที่ 180 พบว่า กระถินยักษ์ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีความสามารถในดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ไว้ในส่วนลำต้นได้สูงที่สุด รองลงมา กระถินยักษ์ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) > กระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) > กระถินเทพาชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) มีค่าเท่ากับ 2.39 > 2.34 > 2.28 > 2.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนการเปรียบเทียบการสะสมในส่วนใบของพืชทดลองชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ในวันที่ 180 พบว่า กระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีความสามารถในดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ในส่วนใบได้สูงที่สุด รองลง มากระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) > กระถินยักษ์ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) > กระถินยักษ์ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีค่าเท่ากับ 1.99 > 1.87 > 1.44 > 1.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ



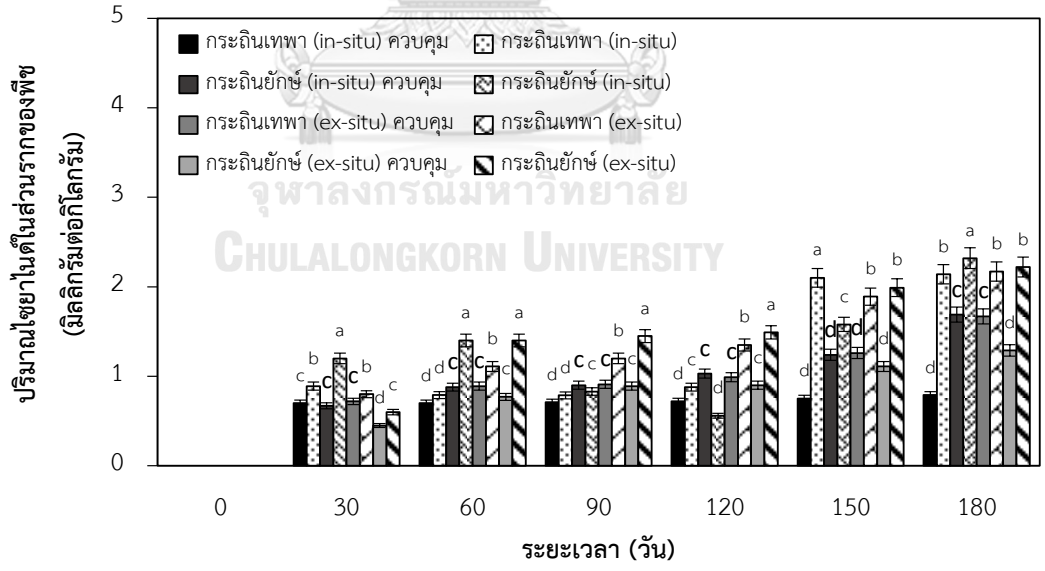
รูปที่ 4.66 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนลำต้นของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.67 ผลของปุ๋ยต่อการสะสมไซยาไนด์ในส่วนใบของหญ้าแฝกและไผ่ป่าในชุดการทดลองที่ปลูกพืชในโรงเรือน (Ex-situ)

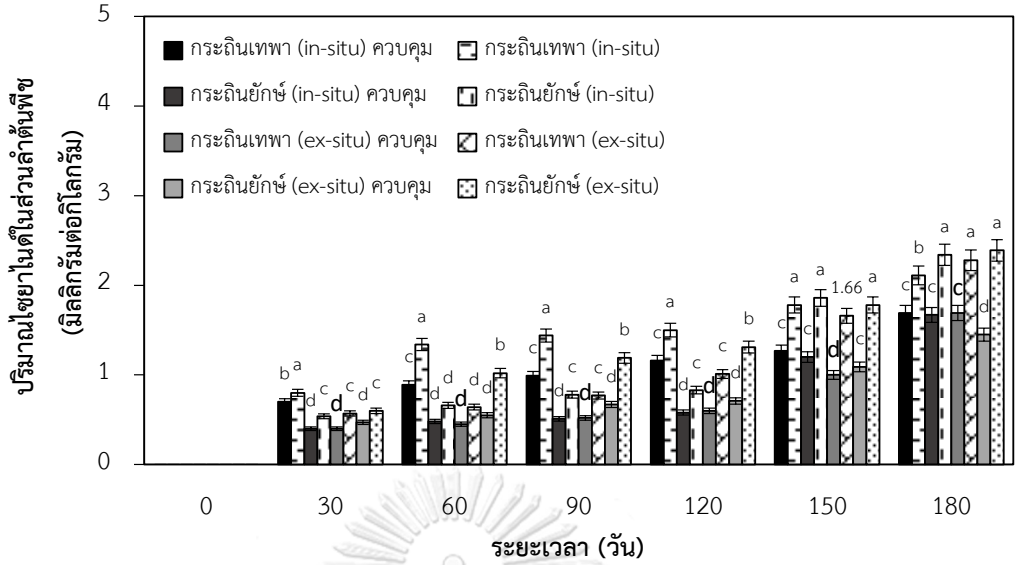
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

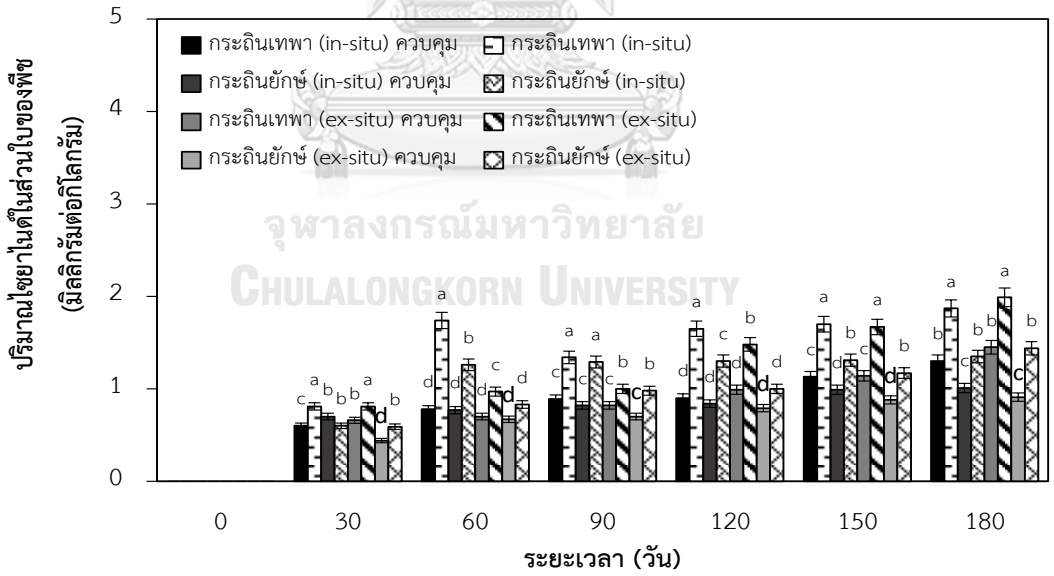
รูปที่ 4.68 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในส่วนรากของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.69 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในส่วนลำต้นของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.70 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในส่วนใบของกระถินเทพาและกระถินยักษ์ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.9 ผลของการสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

จากผลของการใช้ปุ๋ยต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกลุ่มพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ที่ทำการทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และปลูกทดลองในโรงเรือน (Ex-situ) สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า

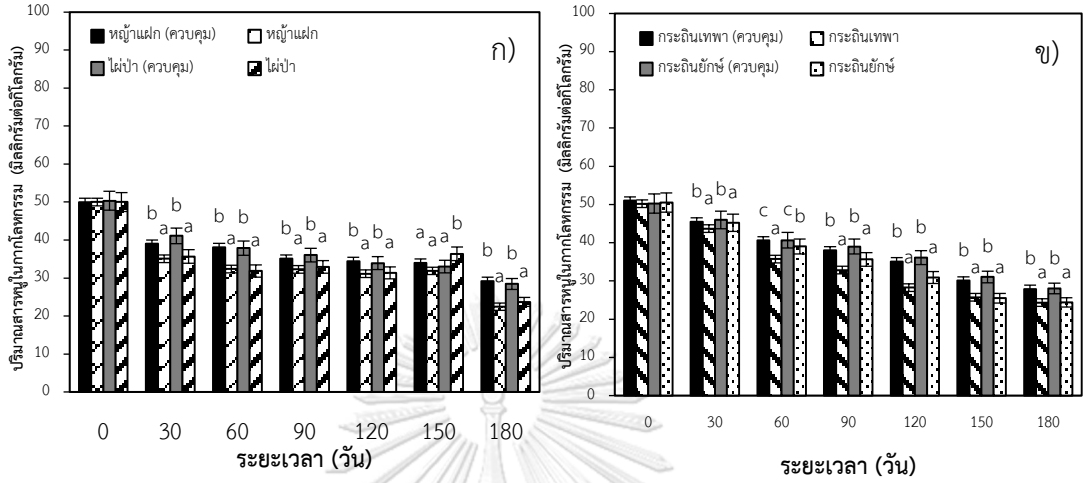
ปุ๋ยเคมีมีผลต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนูในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) โดยเมื่อทำการคำนวณระดับความเข้มข้นของการสะสมสารหนูแล้วนำมาคำนวณกับมวลชีวภาพของพืช พบว่า พืชใบเลี้ยงเดี่ยว คือ หญ้าแฝกชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีอัตราการสะสมสารหนูได้สูงกว่าพืชชนิดอื่นๆ โดยสะสมสารหนูในส่วนใต้ดินสูงที่สุด ส่วนพืชใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ กระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีอัตราการสะสมสารหนูได้สูงกว่าพืชชนิดอื่นๆ โดยสะสมสารหนูไว้ในส่วนใบสูงที่สุด สำหรับปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อทำการคำนวณระดับความเข้มข้นของการสะสมสารแมงกานีสแล้วนำมาคำนวณกับมวลชีวภาพของพืช พบว่า พืชใบเลี้ยงเดี่ยว คือ หญ้าแฝกชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีอัตราการสะสมแมงกานีสได้สูงกว่าพืชชนิดอื่นๆ โดยสะสมแมงกานีสในส่วนใต้ดินสูงที่สุด ส่วนพืชใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ กระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีอัตราการสะสมแมงกานีสได้สูงกว่าพืชชนิดอื่นๆ โดยสะสมแมงกานีสไว้ในส่วนใบสูงที่สุดเช่นเดียวกับการดูดดึงและสะสมของสารหนู ส่วนปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อทำการคำนวณระดับความเข้มข้นของการสะสมสารโลหะหนักแล้วนำมาคำนวณกับมวลชีวภาพของพืช พบว่า พืชใบเลี้ยงเดี่ยว คือ หญ้าแฝกชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีอัตราการสะสมไซยาไนด์ได้สูงกว่าพืชชนิดอื่นๆ โดยสะสมไซยาไนด์ในส่วนเหนือดินสูงที่สุด ส่วนพืชใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ กระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีอัตราการสะสมไซยาไนด์ได้สูงกว่าพืชชนิดอื่นๆ โดยสะสมไซยาไนด์ไว้ในส่วนลำต้นสูงที่สุด

4.10 ผลของการสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรม ชุดการทดลองพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

4.10.1 การสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรมของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

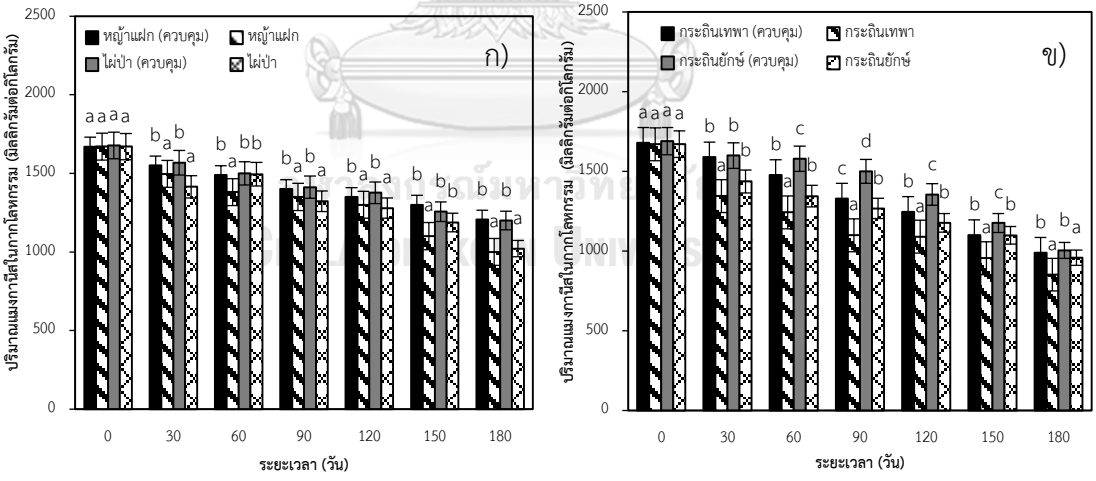
การศึกษาผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อปริมาณการสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรมของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ซึ่งแบ่งออกเป็นการปลูกในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ได้แก่ 1) กระถินเทพา (ควบคุม) 2) กระถินเทพา 3) กระถินยักษ์ (ควบคุม) และ 4) กระถินยักษ์ โดยได้ทำการศึกษาในช่วงระยะเวลาการทดลองตั้งแต่ 0-180 วัน ผลการศึกษาปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรม ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) (ดังรูปที่ 4.70) พบว่า ปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรมมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น โดยพบว่า ในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) กากโลหกรรมในแต่ละชุดของการทดลองมีปริมาณสารหนู เท่ากับ 22.46, 23.72, 23.34 และ 24.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ อย่างไรก็ตามผลการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าปริมาณสารหนูในพืชทดลอง โดยพบว่า พืชมีการสะสมสารหนูเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของพืชเพิ่มขึ้น เนื่องจากพืชมีกลไกในการดูดดึงแร่ธาตุ โลหะหนักต่าง ๆ หรือสารปนเปื้อนที่อยู่ในตัวกลาง เช่น ดินและน้ำ ผ่านทางรากไปสะสมไว้ยังส่วนต่าง ๆ ของพืชได้ (Sarma, 2011) สำหรับการศึกษาปริมาณแมงกานีสในกากโลหกรรม พบว่า ในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีปริมาณแมงกานีสในกากโลหกรรมในแต่ละชุดการทดลอง เท่ากับ 999.85, 1,021.32, 852.88 และ 957.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.71) ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่า แปลงทดลองที่มีการปลูกหญ้าแฝก และกระถินเทพา มีความสามารถในลดปริมาณแมงกานีสในกากโลหกรรมได้สูงที่สุด ส่วนการศึกษาปริมาณไซยาไนด์ในกากโลหกรรม พบว่า ในวันสิ้นสุดการทดลอง (180 วัน) มีปริมาณไซยาไนด์ในกากโลหกรรมแต่ละชุดการทดลอง เท่ากับ 0.07, 0.10, 0.09 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.72) ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยปริมาณการสะสมของโลหะหนักในดินนั้นขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของโลหะหนัก ความสามารถในการละลายของโลหะหนัก ความทนทานต่อโลหะหนักของพืช และชนิดของพืช (Kufka และ Kurus, 1997) ทั้งนี้ส่วนหนึ่งยังเกิดจากการชะล้างตามธรรมชาติ โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดการชะล้างคือ น้ำ และลม (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร, 2551) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ สุภาพร แป้งทา (2552) ที่ทำการศึกษาโดยการใช้สับปะรดเป็นตัวชี้วัดความเป็นพิษของโครเมียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยพบว่า

เมื่ออายุของสับปะรดเพิ่มขึ้นส่งผลให้พืชมีการดูดดึงโครเมียมเข้าสู่ส่วนเหนือดินเพิ่มขึ้น และทำให้ปริมาณโครเมียมในดินมีค่าลดลง



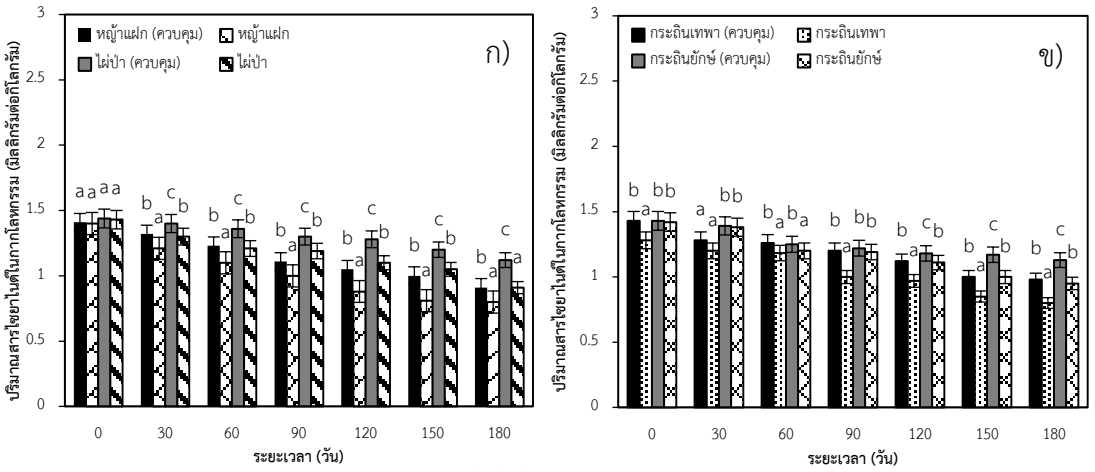
รูปที่ 4.71 ปริมาณการสะสมสารหนูในกากโลหกรรมชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ก) พืชใบเลี้ยงเดี่ยว และ ข) พืชใบเลี้ยงคู่

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.72 ปริมาณการสะสมแมงกานีสในกากโลหกรรมชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ก) พืชใบเลี้ยงเดี่ยว และ ข) พืชใบเลี้ยงคู่

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.73 ปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในกากโลหกรรมชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ก) พืชใบเลี้ยงเดี่ยว และ ข) พืชใบเลี้ยงคู่

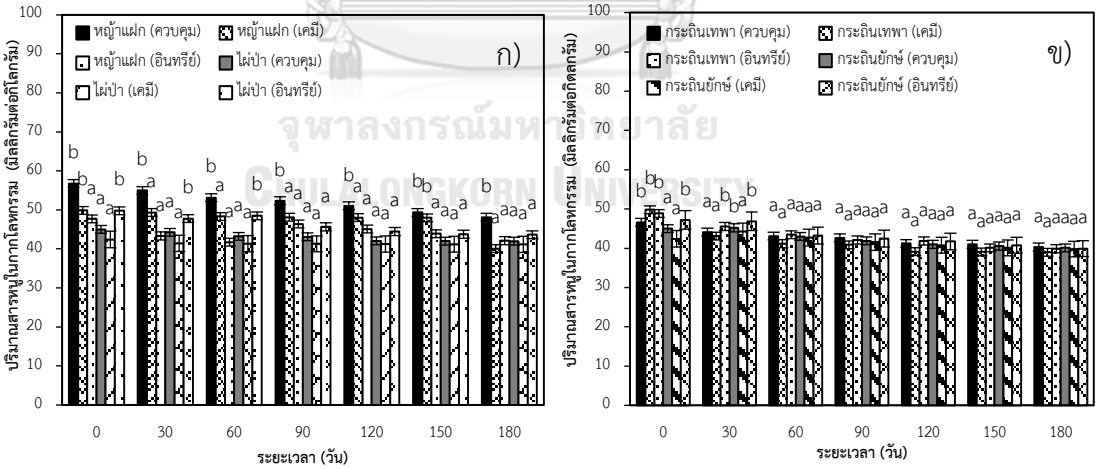
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.10.2 การสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรมของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรมของชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่ช่วงระยะเวลาของการทดลองตั้งแต่ 0-180 ประกอบด้วย 1) หญ้าแฝก (ควบคุม) 2) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี 3) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 4) ไผ่ป่า (ควบคุม) 5) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี 6) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 7) กระถินเทพา (ควบคุม) 8) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี 9) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 10) กระถินยักษ์ (ควบคุม) 11) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี 12) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ ผลการทดลองพบว่า ปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรมมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น โดยปริมาณการสะสมสารหนูในกากโลหกรรมของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ตั้งแต่เริ่ม 0-180 วัน อยู่ในช่วง 48.12-40.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ที่ 180 วัน พบว่า ชุดทดลองที่ทำการปลูกหญ้าแฝกและใส่ปุ๋ยเคมีมีค่าการสะสมสารหนูในกากโลหกรรมน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 40.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับพืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 40.32-39.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ที่ 180 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่ทำการปลูกกระถินเทพาและใส่ปุ๋ยเคมีมีค่าการสะสมสารหนูในกากโลหกรรมน้อยที่สุด มีเท่ากับ 39.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ดังรูปที่ 4.73) สำหรับปริมาณแมงกานีสในกากโลหกรรมของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว พบการสะสมที่ 0-180 วัน อยู่ในช่วง 1,480.80-1,436.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ที่ 180 วัน พบว่า ชุดทดลองที่ปลูกหญ้าแฝกและใส่ปุ๋ยอินทรีย์มีค่าการสะสมแมงกานีสในกากโลหกรรมน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 1,436.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับ

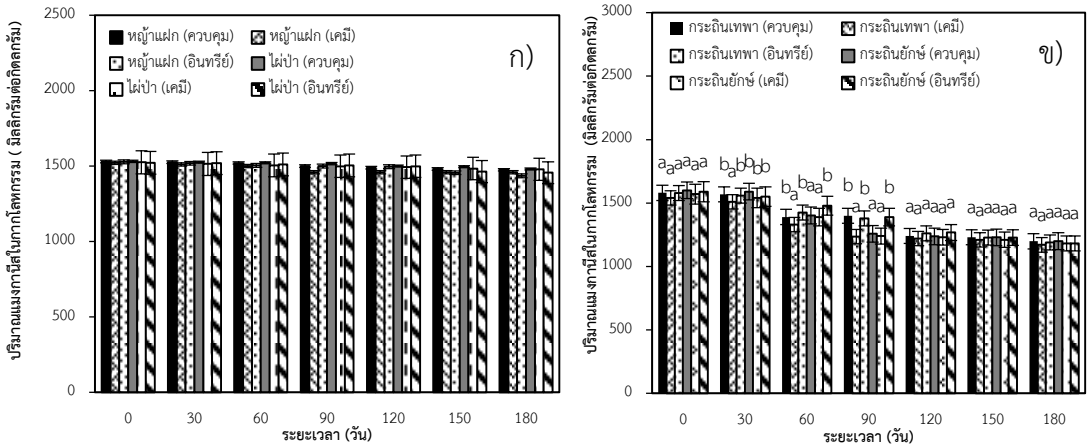
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

พืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 1,199.23-1,170.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ที่ 180 วัน พบว่า ชุดทดลองที่ปลูกกระถินเทพาและใส่ปุ๋ยเคมีมีค่าการสะสมแมงกานีสในกากโลหกรรมน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 1,170.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ดังรูปที่ 4.74) ส่วนปริมาณไซยาไนด์ในกากโลหกรรมของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ตั้งแต่เริ่ม 0-180 วัน พบค่าการสะสมอยู่ในช่วง 1.43-0.78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ที่ 180 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่ทำการปลูกหญ้าแฝกและใส่ปุ๋ยเคมี มีค่าการสะสมไซยาไนด์ในกากโลหกรรมน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับพืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า มีค่าการสะสมไซยาไนด์อยู่ในช่วง 1.20-1.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยที่การทดลอง 180 วัน พบว่า ชุดที่ทำการปลูกกระถินเทพาและใส่ปุ๋ยเคมี มีค่าการสะสมไซยาไนด์ในกากโลหกรรมน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 1.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ดังรูปที่ 4.75) ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชุดการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีมีแนวโน้มของปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรมลดลงมากกว่าชุดการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Ruangkum (2007) ที่ได้ทำการศึกษาผลของปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อแคดเมียมและสังกะสีในรูปที่พืชดูดดึงได้ในดินรวมไปถึงสะสมในอ้อย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 1) การศึกษาในพื้นที่จริง ทำการเก็บตัวอย่างดินและอ้อยจากพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน ในอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก 2) การศึกษาในเรือนเพาะชำโดยใช้ดินจากอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยผลการศึกษาพบว่า การทดลองในเรือนเพาะชำโดยใช้ดินจากอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ที่มีอัตราการเติมปุ๋ยฟอสฟอรัสสูงขึ้นทำให้การสะสมแคดเมียม และสังกะสีในดินลดลง



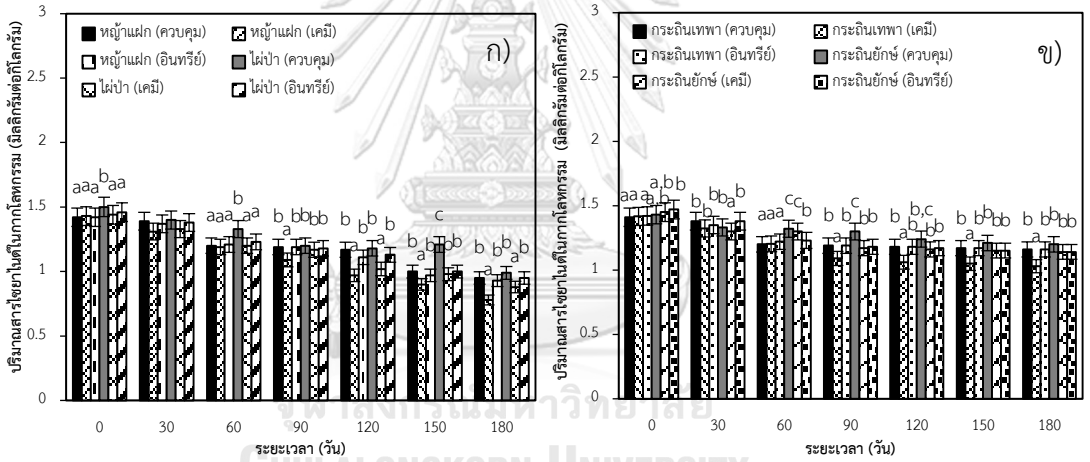
รูปที่ 4.74 ปริมาณการสะสมสารหนูในกากโลหกรรมชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (Ex-situ) ก) พืชใบเลี้ยงเดี่ยว และ ข) พืชใบเลี้ยงคู่

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.75 ปริมาณการสะสมแมงกานีสในกากโลหกรรมชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (Ex-situ) ก) พืชใบเลี้ยงเดี่ยว และ ข) พืชใบเลี้ยงคู่

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.76 ปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในกากโลหกรรมชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (Ex-situ) ก) พืชใบเลี้ยงเดี่ยว และ ข) พืชใบเลี้ยงคู่

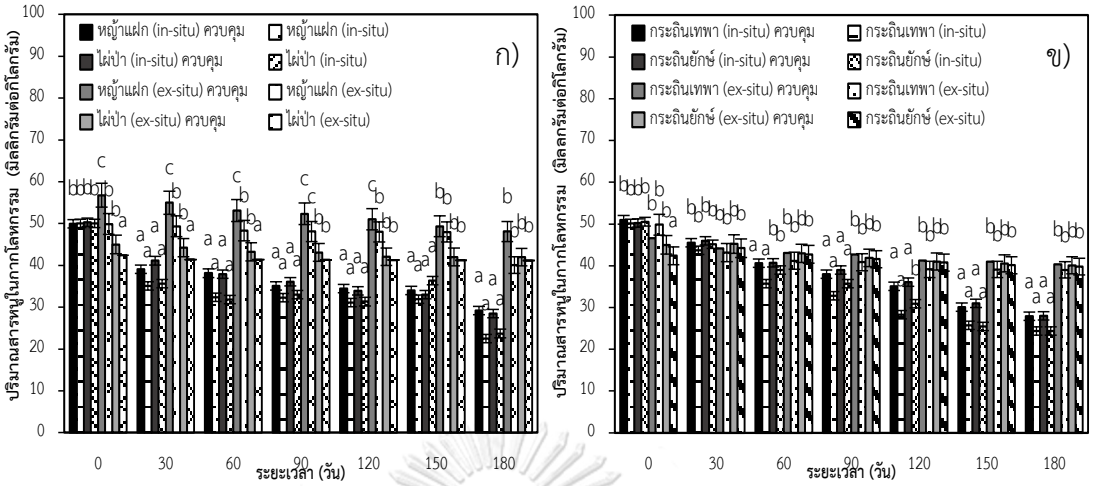
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.10.3 เปรียบเทียบปริมาณการสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรมของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

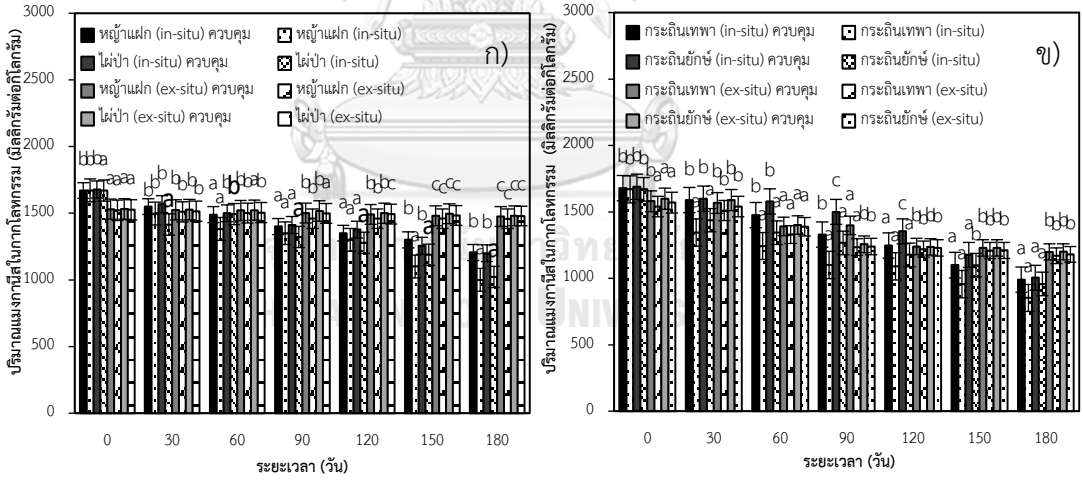
การเปรียบเทียบผลของการเติมปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรม ในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ได้แก่

1) หญ้าแฝก (ควบคุม) 2) หญ้าแฝก 3) ไผ่ป่า (ควบคุม) 4) ไผ่ป่า 5) กระถินทพา (ควบคุม) 6) กระถินเทพา 7) กระถินยักษ์ (ควบคุม) และ 8) กระถินยักษ์ ส่วนชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ได้แก่ 1) หญ้าแฝก (ควบคุม) 2) หญ้าแฝก-เคมี 3) ไผ่ป่า (ควบคุม) และ 4) ไผ่ป่า-เคมี 5) กระถินทพา (ควบคุม) 6) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี 7) กระถินยักษ์ (ควบคุม) และ 8) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี โดยพบว่า ปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรมมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นทั้งในชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณสารหนูในกากโลหกรรมในวันที่ 180 ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว พบว่า ชุดการทดลองที่ปลูกหญ้าแฝกในแปลงทดลอง มีการลดลงของสารหนูในกากโลหกรรมสูงที่สุด รองลงมาคือ ชุดไผ่ป่าที่ปลูกในแปลงทดลอง > ชุดหญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี > ชุดไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีค่าการสะสมสารหนูในกากโลหกรรมเท่ากับ 22.46, 23.72, 40.05 และ 41.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนพืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า ชุดการทดลองที่ปลูกกระถินเทพาในแปลงทดลอง มีการลดลงของสารหนูในกากโลหกรรมสูงที่สุด รองลงมาคือ ชุดกระถินยักษ์ที่ปลูกในแปลงทดลอง > ชุดกระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี > ชุดกระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีค่าการสะสมเท่ากับ 24.34, 24.37, 39.01 และ 39.77 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.76) ส่วนปริมาณแมงกานีสในกากโลหกรรมของชุดการทดลองพืชใบเลี้ยงเดี่ยว พบว่า ชุดการทดลองที่ปลูกหญ้าแฝกในแปลงทดลอง มีการลดลงของแมงกานีสในกากโลหกรรมสูงที่สุด รองลงมาคือ ชุดไผ่ป่าที่ปลูกในแปลงทดลอง > ชุดหญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี > ชุดไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีค่าการสะสมเท่ากับ 999.85, 1,021.32, 1,458.88 และ 1,479.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลองพืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า ชุดกระถินเทพาที่ปลูกในแปลงทดลอง มีการลดลงของแมงกานีสในกากโลหกรรมสูงที่สุด รองลงมาคือ ชุดกระถินยักษ์ที่ปลูกในแปลงทดลอง > ชุดกระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี > ชุดกระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีค่าการสะสมเท่ากับ 852.88, 957.97, 1,170.45 และ 1,181.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.77) และสำหรับการเปรียบเทียบปริมาณไซยาไนด์ในกากโลหกรรม ชุดพืชใบเลี้ยงเดี่ยว พบว่า ชุดหญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการลดลงของไซยาไนด์ในกากโลหกรรมสูงที่สุด รองลงมาคือ ชุดหญ้าแฝกที่ปลูกในแปลงทดลอง > ชุดไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี > ชุดไผ่ป่าที่ปลูกในแปลงทดลอง มีค่าการสะสมเท่ากับ 0.78, 0.80, 0.88 และ 0.91 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนชุดพืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า ชุดกระถินเทพาที่ปลูกในแปลงทดลอง มีการลดลงของไซยาไนด์ในกากโลหกรรมสูงที่สุด รองลงมาคือ ชุดกระถินยักษ์ที่ปลูกในแปลงทดลอง > ชุดกระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี > ชุดกระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีค่าการสะสมเท่ากับ 0.80, 0.95, 1.03 และ 1.14 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.78)



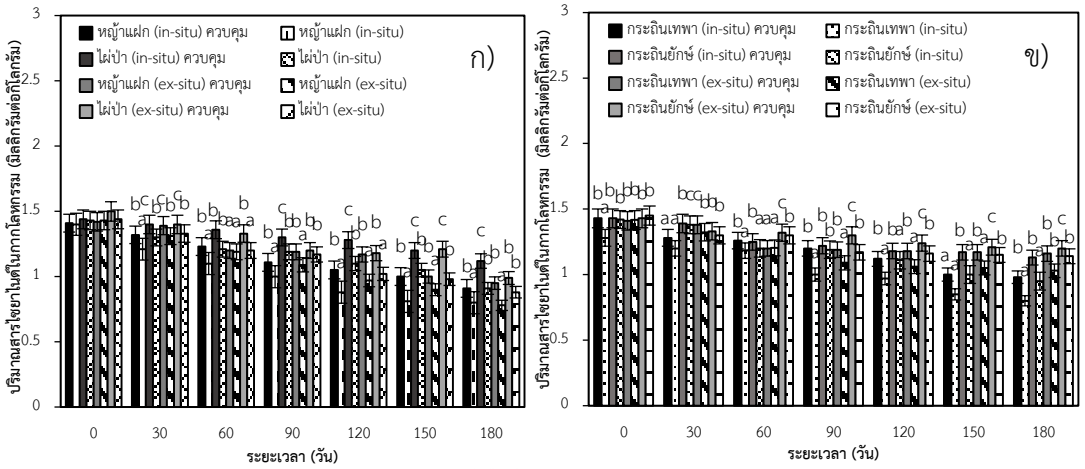
รูปที่ 4.77 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมสารหนูในกากโลหกรรม ก) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และ ข) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.78 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมแมงกานีสในกากโลหกรรม ก) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และ ข) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษ บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.79 เปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการสะสมไซยาไนด์ในกากโลหกรรม ก) ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และ ข) ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษบอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.11 สมดุลมวล (Mass Balance) ของการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

การศึกษาสมดุลมวลนี้ เป็นการศึกษาปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ที่มีอยู่ในระบบ โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรมทั้งหมดและพืชทดลอง (พืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่) และทำการแบ่งการสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ออกเป็นส่วนต่าง ๆ ของพืช คือ ส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินสำหรับพืชใบเลี้ยงเดี่ยว และส่วนราก ลำต้น และใบ สำหรับพืชใบเลี้ยงคู่ ทั้งนี้เพื่อเป็นการแสดงเปอร์เซ็นต์ของการสะสมที่ชัดเจนยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการทำสมดุลมวลในครั้งนี้ได้ทำเฉพาะชุดการทดลองในเรือนทดลอง (Ex-situ) เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากชุดทดลองในพื้นที่ (In-situ) หรือในพื้นที่จริงนั้นไม่สามารถทำการสมดุลมวลได้เนื่องจากไม่สามารถควบคุมทั้งระบบได้ ดังนั้นผลการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำเสนอเฉพาะในระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 180 วัน ดังแสดงไว้ในภาคผนวก จ ซึ่งจากการศึกษา พบว่าผลรวมของปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ทั้งระบบมีไม่ครบ 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์บางส่วนมีการสูญหายไปจากระบบนั้น โดยอาจมีสาเหตุมาจากมีการติดอยู่กับภาชนะที่ปลูกหรือพลาสติกหุ้มถุง และวัสดุปลูกที่ใช้ในการทดลอง จึงอาจทำให้ปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์บางส่วนหายไปจากระบบได้ อย่างไรก็ตามเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่หายไปจากระบบโดยเฉลี่ยเท่ากับ 10-20 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ทั้งนี้จากการวิเคราะห์สมดุลมวลทั้ง 12 ชุดการทดลอง ประกอบด้วย 1) หญ้าแฝกชุดควบคุม 2) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี 3) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 4) ไผ่ป่าชุดควบคุม 5) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี 6) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 7) กระถินเทพาชุดควบคุม 8) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี 9) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 10) กระถินยักษ์ชุดควบคุม 11) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี และ 12) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ พบว่า ปริมาณการสะสมสารหนู แมงกานีส ในพืชใบเลี้ยงเดี่ยว มีเปอร์เซ็นต์การสะสมในส่วนใต้ดินสูงกว่าส่วนเหนือดิน และมีเปอร์เซ็นต์การสะสมไซยาไนด์สูงที่สุดในส่วนเหนือดิน ส่วนปริมาณการสะสมสารหนู แมงกานีส ในพืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า มีเปอร์เซ็นต์การสะสมในส่วนใบสูงที่สุด และมีเปอร์เซ็นต์การสะสมไซยาไนด์สูงที่สุดในส่วนลำต้น สำหรับปริมาณการสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรม พบว่า เปอร์เซ็นต์การสะสมสารหนูแมงกานีส และไซยาไนด์ลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณสารหนูในกากโลหกรรมของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ได้แก่ 1) หญ้าแฝกชุดควบคุม 2) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี 3) หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 4) ไผ่ป่าชุดควบคุม 5) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยเคมี และ 6) ไผ่ป่าที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ ในวันที่ 180 มีค่าการสะสมคิดเป็นร้อยละ 92.39, 81.54, 85.30, 96.39, 87.30 และ 88.50 ตามลำดับ ส่วนปริมาณแมงกานีส มีค่าการสะสมคิดเป็นร้อยละ 83.86, 88.12, 86.06, 89.27, 88.62 และ 87.24 ตามลำดับ สำหรับปริมาณไซยาไนด์ มีค่าการสะสมคิดเป็นร้อยละ 95.17, 86.86, 90.67, 94.43, 85.62 และ 88.88 ตามลำดับ ของชุดการทดลอง และปริมาณสารหนูในกากโลหกรรมของพืชใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ 1) กระถินเทพาชุดควบคุม 2) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมี 3) กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ 4) กระถินยักษ์ชุดควบคุม 5) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมี และ 6) กระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ ในวันที่ 180 มีค่าการสะสมคิดเป็นร้อยละ 81.57, 79.11, 80.06, 81.50, 80.19 และ 80.03 ตามลำดับ ส่วนปริมาณแมงกานีส มีค่าการสะสมคิดเป็นร้อยละ 72.61, 72.15, 73.25, 73.49, 72.52 และ 73.35 ตามลำดับ สำหรับปริมาณไซยาไนด์ มีค่าการสะสมคิดเป็นร้อยละ 77.96, 71.88, 78.22, 67.78, 67.65 และ 77.78 ตามลำดับ ของชุดการทดลอง โดยพบว่า ในชุดการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีทั้งชุดการทดลองพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่ มีแนวโน้มหรือมีเปอร์เซ็นต์การสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในกากโลหกรรมต่ำที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลของการใช้ปุ๋ยต่อการดูดดึงและสะสมสารหนู (As) แมงกานีส (Mn) และไซยาไนด์ (CN) ด้วยพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่ บริเวณบ่อเก็บกากโลหกรรม จากการทำเหมืองแร่ทองคำ ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การศึกษาในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) และ 2) การศึกษาในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) โดยทำการศึกษาความสามารถในการดูดดึงสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ ออกจากกากโลหกรรม และทำการศึกษาปริมาณการสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในส่วนต่างๆ ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ได้แก่ หญ้าแฝก และไผ่ป่า และพืชใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ กระถินเทพา และกระถินยักษ์ ตามระยะเวลาของการทดลอง 180 วัน ซึ่งสามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลของการใช้ปุ๋ยต่อการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ ชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ)

1) สมบัติทางกายภาพและเคมีของกากโลหกรรม พบว่า มีปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ อยู่ในช่วง 50-51, 1,670-1,670 และ 0.10-1.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ระหว่าง 6.67-6.72 ค่าการนำไฟฟ้า มีค่าระหว่าง 1,847-1,930 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

2) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำที่ใช้ในการทดลอง มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6.3-6.8 มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 1,858 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าออกซิเจนละลายน้ำ เท่ากับ 8.80 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน เท่ากับ 290.23 มิลลิโวลต์ และมีปริมาณสารหนูและแมงกานีส เท่ากับ 0.2101 และ 0.3087 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับและไซยาไนด์ไม่พบการปนเปื้อน

3) สมบัติกากโลหกรรมตลอดระยะเวลาของการทดลอง พบว่า ความเป็นกรด-ด่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากเวลาเริ่มต้นของการทดลองถึง 180 วัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 6.01-7.82 โดยค่าการนำไฟฟ้าในทุกชุดทดลองมีแนวโน้มลดลง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 448.25 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร หรืออยู่ในช่วง 334.67-691.67 ไมโครซีเมนต์/เซนติเมตร สำหรับค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน พบว่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 262.52 หรืออยู่ในช่วง 210.44-295.5 มิลลิโวลต์

4) การเจริญเติบโตของพืชทดลองด้านน้ำหนักแห้ง พบว่า พืชใบเลี้ยงเดี่ยว คือ หญ้าแฝก มีการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพมากกว่าไผ่ป่า ในทุกช่วงระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง ซึ่งการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เจริญเติบโตในแต่ละช่วงระยะเวลาของการทดลอง พบว่า พืชทั้งสองชนิดค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P \leq 0.05$) สำหรับพืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า กระถินเทพามีการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพมากกว่ากระถินยักษ์ในทุกช่วงเวลาของการเก็บตัวอย่าง ซึ่งค่าการเจริญเติบโตของพืชทั้งสองชนิดในแต่ละช่วงเวลาของการทดลอง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

5) ความสูง สำหรับพืชใบเลี้ยงเดี่ยว พบว่า หญ้าแฝกและไผ่ป่ามีความสูงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว โดยหญ้าแฝกมีการเจริญเติบโตด้านความสูงมากที่สุด เฉลี่ยเท่ากับ 210 เซนติเมตร ส่วนพืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า กระถินเทพามีอัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงมากที่สุด เฉลี่ยเท่ากับ 116.67 เซนติเมตร

6) อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ พบว่า พืชทดลองทั้งพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่ มีค่าการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น

7) การแสดงความเป็นพิษของพืช พบว่า เปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของพืชเพิ่มขึ้นตามอายุของพืชทดลองที่เพิ่มขึ้น โดยพืชใบเลี้ยงเดี่ยว คือ ไผ่ป่ามีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษสูงกว่าหญ้าแฝก ส่วนพืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า กระถินยักษ์มีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษสูงกว่ากระถินเทพา

8) ผลของปุ๋ยเคมีต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในส่วนต่างๆ ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว พบว่า ชุดการทดลองในแปลงทดลองในพื้นที่ (In-situ) หญ้าแฝกมีความสามารถในการดูดดึง สารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ ได้ดีกว่าไผ่ป่า โดยมีความสามารถในการดูดดึงและสะสมไว้ในส่วนใต้ดิน (Root) ได้ในปริมาณที่สูงกว่าส่วนเหนือดิน (Shoot) ส่วนพืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า กระถินเทพามีความารถในการดูดดึงสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ได้ดีกว่ากระถินยักษ์ โดยสามารถดูดดึงและสะสมไว้ในส่วนใบ (Leaf) ได้ในปริมาณที่สูงกว่าส่วนราก (Root) และลำต้น (Stem)

5.1.2 ผลของการใช้ปุ๋ยต่อการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

1) สมบัติทางกายภาพและเคมีของกากโลหกรรม พบว่า มีปริมาณสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์เริ่มต้น อยู่ในช่วง 50.00-51.55, 1,670.60-1,670.92 และ 0.14-1.21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 6.34-6.72 ค่าการนำไฟฟ้า มีค่าระหว่าง 1,606-1,937 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

2) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำที่ใช้ในการทดลอง มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.3-6.8 มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 1,858.67 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าออกซิเจนละลายน้ำ เท่ากับ 8.80 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน เท่ากับ 290.23 มิลลิโวลต์

และมีปริมาณสารหนูและแมงกานีส เท่ากับ 0.2101 และ 0.3087 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับและไซยาไนด์ไม่พบการปนเปื้อน

3) สมบัติกากโลหกรรมตลอดระยะเวลาของการทดลอง พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากเวลาเริ่มต้นของการทดลองถึง 180 วัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.34-7.85 ส่วนค่าการนำไฟฟ้า มีแนวโน้มลดลง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 488.36 หรืออยู่ในช่วง 222.73-846.66 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร สำหรับค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน พบว่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 287.77 หรืออยู่ในช่วง 272.33-301.57 มิลลิโวลต์

4) การเจริญเติบโตของพืชทดลองด้านน้ำหนักแห้ง พบว่า พืชใบเลี้ยงเดี่ยว คือ หญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี มีการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพมากที่สุดในทุกช่วงเวลาของการเก็บตัวอย่าง โดยมีมวลชีวภาพเท่ากับ 643.32 กรัม สำหรับพืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพมากที่สุดในทุกชุดการทดลอง โดยมีมวลชีวภาพเท่ากับ 989.17 กรัม

5) ความสูง สำหรับพืชใบเลี้ยงเดี่ยว พบว่า แฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีอัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงมากที่สุด โดยมีความสูงเฉลี่ยเท่ากับ 189.88 เซนติเมตร ส่วนพืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า กระถินเทพาที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีอัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงที่สุด โดยมีความสูงเฉลี่ยเท่ากับ 105.33 เซนติเมตร

6) อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว พบว่า หญ้าแฝกชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมี และหญ้าแฝกชุดการทดลองที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ มีค่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์สูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ โดยค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ส่วนพืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า กระถินเทพาที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี และกระถินเทพาที่มีการใส่ปุ๋ยอินทรีย์มีค่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพันธ์ลดลงอย่างชัดเจน แต่ค่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

7) การแสดงความเป็นพิษของพืช พบว่า การแสดงความเป็นพิษของพืชในแต่ละชุดทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาของการทดลอง เป็นที่น่าสังเกตว่า ในชุดการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี สามารถทำให้พืชมีการแสดงความเป็นพิษได้มากกว่าชุดการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ โดยหญ้าแฝกที่ใส่ปุ๋ยเคมี และกระถินยักษ์ที่ใส่ปุ๋ยเคมีมีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษสูงกว่าในทุกชุดการทดลอง

8) ผลของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ในส่วนต่าง ๆ ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า พืชใบเลี้ยงเดี่ยว คือ หญ้าแฝกชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีมีอัตราการสะสมสารหนูได้สูงกว่าพืชชนิดอื่น ๆ โดยสะสมสารหนูในส่วนใต้ดิน (Root) สูงที่สุด ส่วนพืชใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ กระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีมีอัตราการสะสมสารหนูได้สูงกว่าพืชชนิดอื่น ๆ โดยสะสมสารหนูไว้ในส่วนใบ (Leaf) สูงที่สุด สำหรับปริมาณการดูดดึงและสะสมแมงกานีสในพืชใบ

เลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อทำการคำนวณระดับความเข้มข้นของการสะสมสารแมงกานีสแล้วนำมาคำนวณกับมวลชีวภาพของพืช พบว่า พืชใบเลี้ยงเดี่ยว คือ หญ้าแฝกชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีมีอัตราการสะสมแมงกานีสได้สูงกว่าพืชชนิดอื่น ๆ โดยสะสมแมงกานีสในส่วนใต้ดินสูงที่สุด ส่วนพืชใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ กระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีมีอัตราการสะสมแมงกานีสได้สูงกว่าพืชชนิดอื่นๆ โดยสะสมแมงกานีสไว้ในส่วนใบ (Leaf) สูงที่สุดเช่นเดียวกับการดูดดึงและสะสมของสารหนู ส่วนปริมาณการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อทำการคำนวณระดับความเข้มข้นของการสะสมสารโลหะหนักแล้วนำมาคำนวณกับมวลชีวภาพของพืช พบว่า พืชใบเลี้ยงเดี่ยว คือ หญ้าแฝกชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีมีอัตราการสะสมไซยาไนด์ได้สูงกว่าพืชชนิดอื่น ๆ โดยสะสมไซยาไนด์ไว้ในส่วนเหนือดิน (Shoot) สูงที่สุด ส่วนพืชใบเลี้ยงคู่ ได้แก่ กระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีมีอัตราการสะสมไซยาไนด์ได้สูงกว่าพืชชนิดอื่น ๆ โดยสะสมไซยาไนด์ไว้ในส่วนลำต้น (Stem) สูงที่สุด โดยพบว่าชุดการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีมีอัตราการดูดดึงและสะสมสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ได้สูงกว่าชุดการทดลองที่มีการใส่ปุ๋ยอินทรีย์โดยพบว่าอัตราการดูดดึงสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกันทั้งในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่

5.1.3 ผลของการใช้ปุ๋ยต่อการดูดดึงไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูด้วยพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่ บริเวณบ่อเก็บกากโลหกรรม จากการทำเหมืองแร่ทองคำ

การศึกษาผลของการใช้ปุ๋ยต่อการดูดดึงไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูด้วยพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่ สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า พืชทดลองทั้งพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่มีอัตราการเติบโตด้านน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นในทุกช่วงเวลาของการทดลอง ส่วนการแสดงความเป็นพิษของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว พบว่า ไผ่ป่ามีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษสูงกว่าหญ้าแฝก และพืชใบเลี้ยงคู่ พบว่า กระถินยักษ์มีเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษสูงกว่ากระถินเทพา สำหรับการศึกษาผลของปุ๋ยต่อการดูดดึงไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูของพืชศึกษาในพื้นที่บ่อเก็บกากโลหกรรม พบว่า หญ้าแฝกและกระถินเทพาชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) มีความสามารถในการดูดดึงสารหนู แมงกานีส และไซยาไนด์ได้สูงกว่าชุดทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง (In-situ) ผลการทดลองในครั้งนี้ยังพบว่า หญ้าแฝกสามารถดูดดึงและสะสมสารหนูและแมงกานีสไว้ในส่วนใต้ดิน (Root) สูงที่สุด และสามารถดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ได้สูงที่สุดในส่วนเหนือดิน (Shoot) สำหรับกระถินเทพาสามารถดูดดึงและสะสมสารหนูและแมงกานีสไว้ในส่วนใบ (Leaf) และสามารถดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ได้สูงที่สุดในส่วนลำต้น (Stem) ทั้งนี้เนื่องจากในเนื้อเยื่อลำต้นมีเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่มาก และมีการสะสมของโปรตีนในปริมาณที่สูง อีกทั้งในลำต้นมีหมู่ไฮดรอกซิลกรุ๊ป ที่สามารถจับกับโลหะหนัก

และช่วยในการดูดดึงเข้าสู่เนื้อเยื่อได้ดีกว่าในใบ (Gardea-Torresdey et al., 1988), (Pantawat, 2005) ดังนั้น ในกรณีบ่อกักเก็บกากโลหกรรมที่เป็นพื้นที่การศึกษาในครั้งนี้ ควรมีการปลูกกระถินเทพา (พืชใบเลี้ยงคู่) และหญ้าแฝก (พืชใบเลี้ยงเดี่ยว) และเพิ่มประสิทธิภาพการดูดดึงและสะสมสารหนูด้วยการใส่ปุ๋ยเคมี โดยระยะเวลาการปลูกที่เหมาะสมประมาณ 120 วัน เพียงพอต่อการลดการปนเปื้อนไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนู ซึ่งพืชดังกล่าวเป็นพืชที่มีศักยภาพสูงในการดูดดึงสารพิษหรือเป็นพืชที่สามารถช่วยในการลดปริมาณโลหะหนักดังกล่าวได้ ประกอบกับพืชดังกล่าวเป็นพืชท้องถิ่น (Native plants) ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาดินปนเปื้อนไซยาไนด์ แมงกานีส และสารหนูในพื้นที่อื่นๆ ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาความถี่ของการใส่ปุ๋ยและอัตราการใส่ปุ๋ยต่อปริมาณการดูดดึงและการสะสมโลหะหนัก

5.2.2 ควรศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดดึงและการสะสมโลหะหนัก โดยอาจใช้วิธีการเติมสารสังเคราะห์ เช่น สารปรับปรุงดินหรือสารชักนำ (Inducing Agent) เป็นต้น และสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เพื่อให้พืชมีประสิทธิภาพในการดูดดึงสารปนเปื้อนที่อยู่ในดินเข้าสู่ราก ลำต้น และใบ ได้อย่างรวดเร็วและมีปริมาณมากขึ้น

5.2.4 ควรศึกษาด้านความปลอดภัยจากสารพิษเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) เมื่อนำพืชไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่จริงขนาดใหญ่ เนื่องจากกระถินเทพา กระถินยักษ์ หญ้าแฝก และไผ่ป่า สามารถใช้เป็นแหล่งอาหารของสัตว์บางประเภทได้

5.2.5 ควรมีการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำพืชไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ เช่น การนำไปใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง การผลิตหรือการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ต่างๆ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ. 2559ก. กระบวนการ Rhizofiltration. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. แหล่งที่มา : http://www.pcd.go.th/2559/phytoremediation.pdf. [2009, january 22]

กรมควบคุมมลพิษ. 2559ข. เทคโนโลยีการบำบัดด้วยพืช (Phytoremediation). ส่วนน้ำเสียอุตสาหกรรม. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร.

กรมป่าไม้. 2553. กระถินเทพา. ส่วนปลูกป่าภาคเอกชน สำนักส่งเสริมการปลูกป่า กรมป่าไม้. กรมอุทยาน-แห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช. แหล่งที่มา : http://www.dnp.go.th/watershed. [10 พฤศจิกายน 2558]

กรมพัฒนาที่ดิน. 2543. การพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. กองอนุรักษ์ดินและน้ำ กรมพัฒนาที่ดิน. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพมหานคร.

กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. 2554. ไผ่ป่า. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. แหล่งที่มา : http://www.dnp.go.th/EPAC/bamboo_rattan/bamboo15.htm. [10 พฤศจิกายน 2558]

กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. 2558. ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับหญ้าแฝก. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. แหล่งที่มา : http://www.dnp.go.th/watershed/web. [18 พฤศจิกายน 2558]

เกศ สัตยพงศ์. 2555. Arsenic. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:http://www.summacheeva.org/index_thaitox_arsenic.htm [15 พฤศจิกายน2558]

คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2541. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คณะวนศาสตร์. 2554. คู่มือศักยภาพของพรรณไม้สาหรับส่งเสริมภายใต้โครงการกลไกการพัฒนาที่สะอาดภาคป่าไม้. อักษรสยามการพิมพ์, กรุงเทพฯ. หน้า 88

คำหล้า นันทวงศ์. 2554. ผลของกรดไนตริโลไทรอะซีติก (เอนทีเอ) และกรดเอทิลีนไดเอมินเททระอะซีติก (อีดีทีเอ) ต่อการดูดดึงสารหนูที่ปนเปื้อนในดินด้วยไมยราบ. วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โครงการประเทศสีเขียว. 2559. กระถินยักษ์. แหล่งที่มา : http://www.greencoun.com. [20 มิถุนายน 2559]

จันทร์จรัส วีรสาร อรุณศิริ กำลัง และ วรรณา ปลื้มพวก. 2550. ผลของการปลดปล่อย ไนโตรเจนจากมูลโคขุนและมูลโคเลี้ยง ปล่อยต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของ ผักกาดเขียวกวางตุ้ง. วารสารข่าวศูนย์ปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ฉบับที่ 1 ปีที่ 22. มกราคม-มิถุนายน, หน้า 12

ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2540. หนังสือสารานุกรมธาตุ. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

ธงชัย มาลา. 2550. ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพในเทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธิดา พานิช และ ศุภเกียรติ ศรีพนมธนากร. 2558. ผลของการเติมของเสียอินทรีย์ที่มีต่อการดูดดึงตะกั่วโดยทานตะวันจากดินปนเปื้อนตะกั่วระดับสูง. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา. ปีที่ 21 ฉบับที่ 3, หน้า 35-45.

นวรัตน์ อุดมประเสริฐ. 2558. สรีรวิทยาของพืชภายใต้สภาวะเครียด. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิภาพร สุวรรณ์. 2549. ผลของปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมีต่อการดูดกินและสะสมโลหะหนักในข้าวโพดฝักอ่อนที่ปลูกในชุดดินกำแพงแสน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุญณรงค์ ธานีรัตน์. 2538. ผลของระยะปลูกและการใส่ปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตของไม้กระถินเทพาที่ปลูกบนดินเหมืองดีบุกเก่า อำเภอท้ายเหมือง จังหวัดพังงา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปิยะพร วันสม. 2549. ผลของการใส่ปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมี ต่อการดูดกินและสะสมโลหะหนัก ในข้าวโพดหวานที่ปลูกในชุดดินมวกเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พนัส พงศ์ผลาดิศัย. 2553. ผลของการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนจากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช และ นิตยา รื่นสุข. 2556. ผลของพันธุ์ข้าวและชนิดของปุ๋ยต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, ฉบับที่ 1 ปีที่ 18, 105-115.

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2558. การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร :สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

พรพิมล สุริยภัทร. 2552. โรคพืชที่เกิดจากสิ่งไม่มีชีวิต. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://cyberlab.lh1.ku.ac.th/elearn/faculty/forest/fo27/web/lec5.htm. [15 พฤศจิกายน 2558]

พิชญ์นิภา ขวัญเผือก และ วลัยรัตน์ จันทรอัมพร. 2556. การดูดซับสารหนูในน้ำปนเปื้อนด้วยตัวดูดซับสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม. เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 51, กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 5-7 กุมภาพันธ์ 2556, 136-143

ภารินี วนาพรรณ์. 2553. ผลของปุ๋ยเคมีต่อการดูดดึงแคดเมียมด้วยการปลูกอ้อยในดินที่มีการปนเปื้อนจากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม, บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร. 2551. ปฐพีวิทยาเบื้องต้นหน่วยที่15 การพังทลายของดิน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:http://203.158.184.2/elearning/SoilScience/unit1502.htm#head3. [10 เมษายน 2551]

เมธา มีแต้ม. 2011. กลไกระดับเซลล์ในการลดพิษจจากโลหะ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://etm.sc.mahidol.ac.th [29 พฤศจิกายน 2558]

ยงยุทธ โอสถสภา. 2542. ศัพท์ในวงการปุ๋ย. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ยุภาพันธ์ ทองไทย. 2552. การกำจัดเหล็กและแมงกานีสออกจากน้ำผิวดินโดยวิธีจาร์เทสต์ในห้องปฏิบัติการด้วยปูนขาวและแมกนีเซียมคาร์บอเนต. วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตรศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร.

วิวัฒน์ เอกบูระวัฒน์. 2555. Manganese. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.summacheeva.org/index_thaitox_manganese.htm. [15 พฤศจิกายน 2558]

ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและการจัดการภัยพิบัติ. 2558. ภัยร้ายจากสารหนู. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/chemical-hazards/item/99. [15 พฤศจิกายน 2558]

สมฤทัย ตันเจริญ. 2545. อิทธิพลของการใส่ฟางข้าวร่วมกับปุ๋ยเคมีต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของดินผลผลิตและการดูดใช้ธาตุอาหารของข้าวที่ปลูกในดินเนื้อปูนชุดดินลพบุรีในสภาพน้ำขัง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, คณะเกษตร สาขาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุภาพร พงศ์ธรพฤกษ์. 2545. การสะสมตะกั่วและแคดเมียมในพืชผัก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร.

สุภาพร แป้งทา. 2552. การใช้สับปะรดเป็นตัวชี้วัดความเป็นพิษของโครเมียมและตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุรัตนา เสนาะ. 2548. การดูดดึงธาตุโลหะหนักของหญ้าแฝก ทานตะวัน และข้าว ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สายชล สุขญาณกิจ. 2556. การเปรียบเทียบการใช้ทานตะวันและข้าวฟ่างดูดซับตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินที่บ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร. 2551. พระราชบัญญัติปุ๋ย (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550. กรมวิชาการเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพมหานคร.

อัจฉรา จิตตลดากร, สายชล พรมีอยู่, หฤษฎี ภัทรดิลก. 2555. ผลของการใช้ฝุ๋ยมูลวัว ฝุ๋ยหมักและฝุ๋ยเคมีต่อการผลิตผักฝุ๋งจีน. เอกสารประกอบการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช , 4-5 กันยายน 2555, 1-12.

อำนาจ สุวรรณฤทธิ์. 2548. ปุ๋ยกับการเกษตรและสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาษาอังกฤษ

Adaikpoh, E.O. 2011. Sequential extraction of cadmium, lead and zinc in soil profiles of Ifon andEnvirons, southwest Nigeria: Submission for their availability to terrestrial organisms.*Indian Journal of Science and Technology*, 4, 399-403.

Adriano, D.C. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments Biogeochemistry Bioavailability and Risk of Metals. Secondary education, Springer-Verlag, New-York.

Ahmed, S.F.R., Killham, K., and Alexander, I. 2006. Influences of arbuscular fungus *Glomus mosseae* on growth and nutrition of lentil irrigated with arsenic contaminated water. *Plant and Soil*. 283, 33-41.

Amkha, S., Michiko., T., Sagwansupyakorn., C., Sukprakan, S., and Kazuyuki, I. 2006. Effect of amount of nitrogen fertilizer on early growth of leafy vegetables in Thailand. *Japanese Society for Tropical Agriculture*. 50(3), 127-132.

Batty, L.C, and Anslow, M. 2008. Effect of a polycyclic aromatic hydrocarbon on the phytoremediation of zinc by two plant species (*Brassica juncea* and *Festuca arundinacea*). *International Journal of Phytoremediation*, 10, 236 – 251.

Bell, M., Berry, G., and McLaughlin, M. 2001. Managing cadmium in summer grain legumes for premium quality produce. [Online] Available from: http://www.cadmiummanagement.org.au/documents/grain_legumes_brochure.pdf. [2017, July 22]

Blamey, F.P.C., Edwards, G.G., and Asher, C.J. 1987. Nutritional Disorder of Sunflower. Department of Agriculture. University of Queensland, Australia.

Botz, M.M. 2001. Overview of Cyanide Treatment Methods. (Online). Available from: http://www.cyantists.com/treat.htm. [2016, June 15]

Cheema, S.A., Khan, M.I., Shen, C., Tang, X., Farooq, M., Chen, L., Zhang, C., and Chen, Y. 2010. Degradation of phenanthrene and pyrene in spiked soils by single and combined plants cultivation. *Journal of Hazardous Materials*, 177, 384-389.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Chen, Y.P., Rekha, P.D., Arun, A.B., Shen, F.T., Lai, W.A., and Young, C.C. 2006. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Applied Soil Ecology*. 34, 33-41.

Chiu, K.K., Ye, Z.H., and Wong, M.H. 2005. Enhanced uptake of As, Zn, and Cu by Vetiveria zizanioides and Zea mays using chelating agents. *Chemosphere*, 60(10), 1365-1375.

Cunningham, S.D., and Ow, D.W. 1996. Promises and prospects of phytoremediation. [Online]. Availablefrom:https://bioremediation123.wikispaces.com /Phytostabilization. [2016, November 4]

Ebel, M., Evangelou, M.W.H., and Schaeffer, A. 2007. Cyanide phytoremediation by water hyacinths (*Eichhornia crassipes*). *Chemosphere*. 66, 816-823.

Environmental Biotechnology. 2011a. Phytovolatilization. [Online]. Available from: https://knowhowtogmo.wordpress.com/2011/01/31/phytovolatilization/ [2016, June 3]

Environmental Biotechnology. 2011b. Rhizodegradation. [Online]. Available from: https://knowhowtogmo.wordpress.com/2011/01/31/rhizodegradation/. [2016, June 3]

Garcia, M.A., Alonso, J., Fernandedez, M.I., and Melgar, M.J. 1998. Lead content in edible wild mushrooms in northwest Spain as indicator of environmental contamination. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 34(4), 330-335

Gerhardt, K.E., Huang, Xia-Dong, Glick, B.R., and Greenberg, B.M. 2009. Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: potential and challenge. *Plant Science*, 176, 20-30.

Ghosh, M., Paul, J., Jana A., Arpita D., and Mukherjee, A. 2014. Use of the grass, *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash for detoxification and phytoremediation of soils contaminated with fly ash from thermal power plants. *Ecological Engineering*, 74, 258–265.

Hanzhou, H., Menggui, J., Chengwu, L., Ruiming, L., and Zhinong, W. 2009. Seven – step equential extraction procedure to evaluate Cd and Zn mobility in soil. pp. 70-72. In Proceedings of the International Conference on *Environmental Science*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

and Information Application Technology (ESIAT), 3, 4-5 July 2009. The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Computer Society. Wuhan: China.

Hasekawa, I. 2002. Phytoremediation: a Novel Strategy for Removing Toxic Heavy Metals from Contaminate Soils Using Plants. *Farming Japan*, 36(6), 10-15.

Hattsu, S.K., and Hatsu, S.K. 2002. In-house method OR-082-TM. Ministry of Health, Labor and Welfare, Japan.

Hodgson, J.F. 1963. Chemistry of Micronutrient Elements in Soils. In advances in Agronomy 15, *American Society of Agronomy*. Madison, Wisconsin. 5(9), 119-159

Hoffmann, W.A., Poorter, H. 2002. Avoiding Bias in Calculations of Relative Growth Rate. *Annals of Botany*. 90(1), 37- 42.

International Environmental Technology Centre. 2000. Phytoremediation: An environmentally sound technology for pollution prevention, control and remediation an introduction guide to decision-makers. [Online]. Available from: http://www.unep.or.jp/ietc/Publ ications/Freshwater/FMS2/index.asp. [2009, January 24]

International Cyanide Management Code. 2002. Cyanide Facts. [Online]. Available from: http://www.Cyanidecode.org/library/cyanide_facts.html. [2017, March 20]

Jaradot, Q.M., Massadeh, A.M, Zaitoun, M.A, and Maitah, B.M. 2006. Fraction and sequential extraction of heavy metals in the soil of scrapyard of discarded vehicles. *Environmental Monitoring and Assessment*, 112, 197–210.

Jomjun, N. 2009. Phytoremediation of arsenic contaminated submerged soil by aquatic plants. Environmental Management, Graduate School, Chulalongkorn University.

Juarez-Santillan, L.F., Lucho-Constantino, C.A., Vazquez-Rodriguez, G.A., Ceron-Ubilla, N.M., and Beltran-Hernandez, R.I. 2010. Manganese accumulation in plants of the mining zone of Hidalgo, Mexico. *Bioresource technology*, 101(15), 5836-5841.

Kashem, M.A, and Singh B.R. 2007. Solid phase speciation of Cd, Ni and Zn in some contaminated and non-contaminated tropical soils, pp. 213-227. Boca Raton: USA.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Kufka, Z., and Kuras, M. 1997. Heavy metal in soil contaminated from different sources. In ecological Issues and environmental impact assessment. Gulf publishing company. Houston. Taxas. 287-261.

Lee, S., Lee, W., Lee, C., and Kim, J. 2008. Degradation of phenanthrene and pyrene in rhizosphere of grasses and legumes. *Journal of hazardous materials*, 153, 892-898.

Lorenz, S.E., Hamon, R.E., Mcgrath, S.P., Holm, P.E., and Christensen, T.H. 1994. Application of fertilizer cations affect cadmium and zinc concentrations in soil solutions and uptake by plants. *European journal of soil science*. 45,159–165.

Ma, C., Ming, H., Lin, C., Naidu, C., and Bolan, N. 2015. Phytoextraction of heavy metal from tailing waste using napier grass. *Catena soil science publishers*, 136, 74–83.

Maiz, I., Arambarri, R., and Garcia, E.M. 2000. Evaluation of heavy metal availability in polluted soils by two sequential extraction procedures using factor analysis. *Environmental pollution*, 110(1), 3-9.

Manar, R., Bonnard, M., Rast, C., Veber, A., and Vasseur, P. 2011. Ecotoxicity of cyanide complexes in industrially contaminated soils. *Journal of hazardous materials*, 197, 369-377.

Marques, A.P.G.C., Moreira, H., Rangel, A.O.S.S., and Castro, P.M.L. 2008. Arsenic, lead and nickel accumulation in *Rubus ulmifolius* growing in contaminated soil in Portugal. *Journal of hazardous meterials*, 165, 174-179.

Mathias, E., Michael, W.H.E., and Andreas, S. 2006. Cyanide phytoremediation by water hyacinths (*Eichhornia crassipes*). *Chemosphere*, 66, 816-823.

Meehan, M.S. 2000. The aqueous chemistry of cyanide and nitrogen. (Online). Available from: http://thesis.lib.unimelb.edu.au/adtroot/uploads/approved/adtVU2002.0068/public/05_ Ch3.pdf. [2016, October 18]

Merkl, N., Schultze-Kraft, R., and Arias, M. 2005. Influence of fertilizer levels on phytoremediation of crude oil contaminated soil with the tropical pasture grass *Brachiaria brizantha* (Hochst) Stapf. *International Journal of phytoremediation*, 7, 217-230.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Morikawa, H., and Erkin, O.C. 2003. Basic processes in phytoremediation and some applications to air pollution control. *Chemosphere*, 52, 1553-1558.

Morten, L., Stefan, T., and Alessandro, P. 2004. Removal of cyanide by woody plants. *Chemosphere*, 54, 325-333.

Mulugisi G., Gumbo J.R, Dacosta F.A, and Muzerengi C. 2009. The use of indigenous grass species as part of rehabilitation of mine tailings: A case study of New Union Gold Mine. In Proceedings of the International Mine Water Conference. Pretoria, South Africa.

Newman, L.A., and Reynolds, C.M. 2004. Phytodegradation of organic compounds. *Current Opinion in Biotechnology*, 15, 225-230.

Nuril, H., Titi, J., and Fauzia, S. 2009. Mercury and cyanide contaminations in gold mine environment and possible solution of cleaning up by using Phytoextraction. *Journal of biosciences*, 16(3), 88-94.

Paulo, J.C.F., Pratas J., Elisa, M., Gomes, P., and Cala, V. 2011. Selective chemical extraction of Heavy metals in tailings and soils contaminated by mining activity. Environmental implications. *Journal of Geochemical Exploration*, 111(3), 160–171.

Perelo, L.W. 2010. Review: In situ and bioremediation of organic pollutants in aquatic sediments. *Journal of hazardous material*, 177, 81-89.

Piccinin, R.C.R., Ebbs, S.D., Reichman, S.M., Kolev, S.D., Woodrow, I.E., and Baker, A.J.M. 2007. A screen of some native Australian flora and exotic agricultural species for their potential application in cyanide-induced phytoextraction of gold. Minerals engineering, 20(14), 1327-1330.

Qingju, H., and Changsheng, J. 2015. Heavy metal concentrations in soils and plants in Rongxi Manganese Mine of Chongqing, Southwest of China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 46-51

Ratuzny, T., Gong, Z., and Wilke, B.M. 2009. Total concentrations and speciation of heavy metals in soils of the Shenyang Zhangshi Irrigation Area, China. *Environmental monitoring and assessment*, 156(1–4), 171–180.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Ruangkhum, S. 2007. Effect of phosphorus in fertilizer on available cadmium and zinc uptake by sugarcane. Environmental Management, Graduate School, Chulalongkorn University.

Sakakibara, M., Watanabe, A., Inoue, M., Sano, S., and Kaise, T. 2010. Phytoextraction and phytovolatilization of arsenic from arsenic-contaminated soils By Pteris vittata. In Proceedings of the annual International conference on soils, sediments, water and energy, 12(26), 267-272.

Samiotakis, E.S.D. 2004. Possible evidence for transport of an iron cyanide complex by plants. *Environmental pollution*, 127(2), 169-173.

Sampanpanish, P., Chaemgcharoen, W., and Tongcumpau, C. 2008. Heavy metals emoval from contaminated soil by siam weed (*Chromoleana odorata*) and *vetiver grass* (*Vetiveria zizanoides*). *Research journal of chemistry and environment*, 12(3), 23-35.

Sarma, H. 2011. Metal hyperaccumulation in plants: A review focusing on phytoremediation technology. *Journal of Environmental Science and Technology*, 4, 118-138.

Segura-Muñoz, S. I., da Silva Oliveira, A., Nikaido, M., Trevilato, T.M.B., Bocio, A., Takayanagui, A.M.M., and Domingo, J.L. 2006. Metal levels in sugar cane (*Saccharum spp.*) samples from an area under the influence of a municipal landfill and a medical waste treatment system in Brazil. *Environment international*, 32(1), 52–59.

Sheng-wang, P., Shi-qiang, W., Xin, Y., and Sheng-xian, C. 2008. The removal and remediation of phenanthrene and pyrene in soil by mixed cropping of alfalfa and rape. *Agricultural sciences in china*, 7(11), 1355-1364.

Sheng-Yu, X. Ying-Xu, C., Kuang-Fei, L., Xin-Cai, C., Qi, L., Feng, L., and Zhao-Wei, W. 2005. Removal of pyrene from contaminated soils by white clover. *Pedosphere*, 19(2), 265-272.

Shri, M. Kumar, S., Chakrabarty, D., Trivedi, P.K., Mallick, S., Misra, P., Shukla, D., Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R.D., and Tuli, R. 2009. Effect of arsenic on growth, oxidative stress, and antioxidant system in rice seedlings. *National botanical research institute*, 72(4), 1102-1110.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Singh, N., Ma, L.Q., Srivastava, M., and Rathinasabapathi, B. 2006. Metabolic adaptations to arsenic induced oxidative *stress in Pteris* vittata L. and *Pteris ensiformis* L. Plant, *Science Journal*, 170, 274–282.

Susarla, S., Medina, V.F., and Cutcheon, S.C. 2002. Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological engineering*, 18, 647-658.

Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bison, M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate metals. *Analytical chemistry*, 51(7), 844-851.

Trapp, S., Larsen, M., Pirandello, A., and Danquah-Boakye, J. 2003. Feasibility of cyanide elimination using plants. *The european journal of mineral processing and environmental protection*, 3(1), 128-137.

Tu C., Zheng, C.R., and Chen, H.M. 2000. Effect of applying chemical fertilizers on forms of lead and cadmium in red soil. *Chemosphere*, 41, 133–138.

US.EPA. 1994. Treatment of Cyanide Heap Leaches and Tailings. (Online). Available from:http://www.epa.gov/epaoswer/other/mining/techdocs/cyanide.pdf. [2016, June 28]

US.EPA. 1996. Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceous and Organically Based Matrices. Method. 3052. Washington D. C., USA.

US.EPA. 1998. Microwave Assisted Acid Digestion of Aqueons Sample and Extract. Method. 3015A. Washington D. C., USA.

US.EPA. 1999. Phytoremediation resource guide. Office of solid waste and emergency response. Washington D.C., USA.

US.EPA. 2000. Introduction to Phytoremediation. EPA 600/R-99/107. Cincinnati, OH: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, USA.

Villarroel, J R., Chang, A. C., and Amrhein, C. 1993. Cd and Zn phytoavailability of a field-stabilized sludge-treated soil. *Soil Science*, 155(3), 197-205.

Virender, K.S., and Mary, S. 2009. Aquatic arsenic: Toxicity, speciation, transformations, and remediation. *Environment international*, 35(4), 743-759.

Wang, C.V., Briesen, J.M., Brown, W.E., and Minkley, E.G.J. 2004. Microbial communities in two river sediments demonstrate distinct anaerobic PCB dechlorination

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

patterns. American chemical society annual meeting, fall extended abstract published by the Environmental Division.

Watchara, C., Pornsawan, V., Somkiat, K. and Siriporn, L. 2008. Potential of the hybrid marigolds for arsenic phytoremediation and income generation of remediators in Ron Phibun District, Thailand. *Chemosphere*, 70, 1532–1537.

Xiaozhang, Y., Stefan, T., and Puhua, Z. 2004. Metabolism of cyanide by Chinese vegetation. *Chemosphere*, 56, 121-126.

Xiaozhang, Y., Puhua, Z., Yunda, L., and Hao, H. 2005. Detoxification of Cyanide by Woody Plants. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 49, 150-154.

Xiaozhang, Y., Puhua, Z., and Yong-Miao, Y. 2006. The potential for phytoremediation of iron cyanide complex. *Ecotoxicology*, 15, 461-467.

Xu, S.Y., Chen, Y.X., Wu, W.X., Wang, K.X., Lin, Q., and Liang, X.Q. 2006. Enhanced dissipation of phenanthrene and pyrene in spiked soil by combined plants cultivation. *Science of the total environment*, 363, 206-215.

Yang S.X., Deng H., Li M. S. 2008. Manganese uptake and accumulation in a woody hyperaccumulator, *Schima superba*. *Plant Soil Environment*, 54, 441–446

Yu, X.Z., Trapp, S., Zhou P., Wang, C., and Zhou, X. 2004. Metabolism of cyanide by chinese vegetation. *Chemosphere*, 56, 121–126.

Yuan, T.B., Tang, M., and Aoyama, I. 2006. Accumulation and uptake of manganese in a hyperaccumulator phytolacca americana. *Minerals Engineering*, 20(2), 188–190.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

สถานที่ดำเนินการทดลอง

รูปที่ ก-1 พื้นที่บ่อกักเก็บกากโลหกรรม TSF-1

รูปที่ ก-2 ห้องปฏิบัติการ ชั้น 3 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม

ภาคผนวก ข

รูปประกอบในการศึกษา

1 2 3 4 5 6	1-2 การเตรียมพื้นที่และหลุมปลูกพืชทดลอง 3 ปลูกพืชทดลองในพื้นที่ 4 กากโลหกรรมที่นำไปใช้ในการทดลอง 5 การปลูกพืชทดลองในพื้นที่ 6 การแยกส่วนของพืชทดลองและนำไปวิเคราะห์

รูปที่ ข-1 การดำเนินงานวิจัยในพื้นที่จริง (In-situ)

1 2 3 4 5 6	1-2 การเตรียมโรงเรือนและภาชนะปลูก 3 ปลูกพืชทดลองในเรือนโรง 4 กากโลหกรรมที่นำไปใช้ในการทดลอง 5 พืชทดลองเรือนโรง 6 ตัวอย่างกากโลหกรรมที่นำไปวิเคราะห์

รูปที่ ข-2 การดำเนินงานวิจัยในเรือนทดลอง (Ex-situ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1 2 3 4 5 6 7 8	1 ตู้อบความร้อน 2 เครื่องบดตัวอย่าง 3 เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด 4 เครื่องมือย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave) 5 เครื่องวัดค่าศักยภาพออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (ORP Meter) 6 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC Meter) 7 เครื่อง pH Meter 8 เครื่อง Atomic Absorption (Spectrophotometer : AAS)

รูปที่ ข-3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ภาคผนวก ค

วิธีการวิเคราะห์การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยวิธีการสกัดลำดับส่วน (Sequential Chemical Extraction)

1) ชั่งตัวอย่างกากโลหกรรมที่ผ่านการบดและร่อนมาแล้วจำนวน 1 กรัม ใส่หลอด centrifuge ขนาด 100 มิลลิลิตร

2) สกัดรูปแลกเปลี่ยนได้ง่าย โดยเติม $Ca(NO_3)$ ความเข้มข้น 0.1 โมล จำนวน 20 มิลลิลิตร $AgNO_3$ ความเข้มข้น 0.05 โมล จำนวน 20 มิลลิลิตร เขย่า 16 ชั่วโมง ด้วยเครื่องเขย่า

3) หมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 20 นาที ดูด supernatant เก็บในขวดตัวอย่างที่เตรียมไว้

4) ล้างกากโลหกรรมด้วย $Ca(NO_3)_2$ ความเข้มข้น 0.025 โมล จำนวน 40 มิลลิลิตร เขย่า 5 นาที นำไปหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 20 นาที ดูด supernatant เก็บรวมกับขั้นตอนที่ผ่านมาในข้อ 3)

5) นำกากโลหกรรมที่เหลือมาสกัดรูปสารประกอบกับคาร์บอเนตโดยเติม 40 มิลลิลิตร ของ CH_3COONa ความเข้มข้น 1 โมล pH 5 (ปรับ pH ด้วย CH_3COOH) เขย่าทิ้งไว้ 5 ชั่วโมงด้วยเครื่องเขย่า

6) นำไปหมุนเหวี่ยงแล้ววัด pH ของส่วนใสต้องมี pH ไม่เกิน 5±0.1 เก็บ supernatant แล้วทำขั้นตอนที่ 5) ซ้ำจน pH ไม่เปลี่ยนแปลง

7) ทำข้อ 4) ซ้ำ

8) นำกากโลหกรรมที่เหลือมาสกัดตะกั่วที่รูปสารประกอบกับเหล็ก-แมงกานีสออกไซด์โดยเติม $NH_2OH.HCl$ ความเข้มข้น 0.1 โมล จำนวน 20 มิลลิลิตร และ HNO_3 ความเข้มข้น 0.1 โมล จำนวน 20 มิลลิลิตร เขย่า 30 นาที

9) ทำข้อ 3-4 ซ้ำ

10) นำกากโลหกรรมที่เหลือมาสกัดรูปสารประกอบเชิงซ้อนอินทรีย์ โดยเติม $Na_4P_2O_7$ ความเข้มข้น 0.1 M จำนวน 40 มิลลิลิตร เขย่า 24 ชั่วโมง

11) ทำข้อ 3-4 ซ้ำ

12) นำกากโลหกรรมมาเติม $NH_2OH.HCl$ ความเข้มข้น 0.4 โมล ที่เตรียมใน CH_3COOH ความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร จำนวน 40 มิลลิลิตร ต้มในน้ำเดือด 6 ชั่วโมงเขย่าเป็นช่วงๆ ไม่ให้กากโลหกรรมนอนก้น

13) ทำข้อ 3-4 ซ้ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

14) นำกากโลหกรรมที่เหลือไปอบแห้งที่ 105° ซ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

15) ชั่งกากโลหกรรมที่เหลือที่อบแห้งแล้วมา 0.1 gใส่หลอดสำหรับใช้กับเครื่อง microwave

16) สกัดรูปที่คงค้างกับของแข็ง โดยเติม HNO_3 จำนวน 8 มิลลิลิตร และ HF ความเข้มข้น 48% จำนวน 4 มิลลิลิตร

17) ย่อยโดยใช้เครื่องไมโครเวฟ โดยตั้งโปรแกรม ให้ความดันเท่ากับ 110 PSI ภายใน 5 นาที และรักษาระดับความดันไว้อีก 5 นาที (USEPA, 1994)

18) หาปริมาณสารหนูและแมงกานีสทั้งหมดด้วยเครื่อง AAS

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ง

สูตรการคำนวณในการศึกษา

1. สูตรการคำนวณหาปริมาณปุ๋ย

กำหนดให้ 1 หลุมมีขนาดเท่ากับ 30×30 เซนติเมตร

ดังนั้น = 0.3×0.3 เมตร

= 0.09 ตารางเมตร

พื้นที่ 1 ไร่ เท่ากับ 1,600 ตารางเมตร

ดังนั้น 1 ไร่ มีจำนวนหลุมเท่ากับ $\frac{1,600}{0.09}$ = 17,777.18

โดย 1 หลุม ใส่ปุ๋ยเท่ากับ 30 กรัม

ดังนั้น พื้นที่ 1 ไร่ ปุ๋ย = 17,777.78×30 (กรัม)

= 533.33 กิโลกรัมต่อไร่

2. การคำนวณปริมาณการสะสมโลหะหนักในพืช

สามารถหาได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{การสะสมโลหะหนักในพืช} = \frac{A \times B}{100}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อ A คือ น้ำหนักแห้งของพืช (กรัม)

B คือ ปริมาณการดูดดึงโลหะหนักในพืช (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

ตัวอย่างเช่น กระถินเทพา ที่ 30 วัน มีน้ำหนักแห้งส่วนราก 2.41 กรัม มีปริมาณการดูดดึงสารหนู 1.65 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมจะได้

$$\text{การสะสมโลหะหนักในพืช} = \frac{2.41 \times 1.65}{1000} = 0.004 \text{ มิลลิกรัม}$$

3. การคำนวณอัตราการเจริญเติบโต

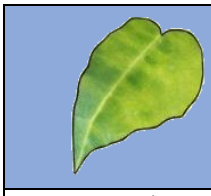
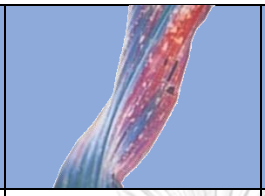
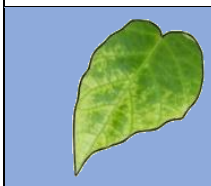
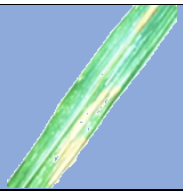
การเจริญเติบสัมพัทธ์ สามารถหาได้จากสูตร ดังนี้

$$\frac{\text{น้ำหนักของพืชเมื่อสิ้นสุดการทดลอง}}{\text{น้ำหนักของพืชเมื่อเริ่มการทดลอง}}$$

ภาคผนวก จ

ลักษณะการแสดงความเป็นพิษของพืช

ตารางที่ จ-1 ลักษณะการแสดงความเป็นพิษของพืชจากการขาดธาตุอาหาร

			
อาการขาดธาตุไนโตรเจน ใบมีสีเขียวจาง แล้วเปลี่ยนเป็นสีเหลือง โดยเฉพาะใบแก่ที่อยู่ตอนล่างของพืช	อาการขาดธาตุฟอสฟอรัส ใบพืชมีลักษณะสีม่วงแดงบนแผ่นใบ เส้นใบและลำต้น	อาการขาดธาตุโพแทสเซียม ลักษณะใบแห้งเป็นมัน พบเห็นชัดเจนในใบที่อยู่ส่วนล่าง ๆ ของต้นพืช	อาการขาดธาตุแคลเซียม เกิดลายบริเวณขอบใบใบเหลือง และมีจุดประขาวอยู่บนยอดใบ ดูคล้ายอาการยอดด่าง
			
อาการขาดธาตุกำมะถัน ใบที่อยู่ส่วนล่างและใบแก่จะมีสีเหลือง ส่วนที่ลำต้นพืชจะแข็งแต่บอบบาง	อาการขาดธาตุโบรอน ขอบใบมีสีเหลืองปนน้ำตาลและใบอ่อนงอ	อาการขาดธาตุคลอรีน ลักษณะใบมีจุดประสีเหลืองอยู่ทั่วทั้งใบ ตรงกลางมีจุดสีน้ำตาล มักเกิดในใบที่อยู่ตอนล่างของต้น	อาการขาดธาตุแมงกานีส ใบมีขนาดเล็กผิดปกติ มีสีเหลือง โดยที่เส้นใบยังคงมีสีเขียวอยู่ มีจุดสีน้ำตาลเล็ก ๆ และอาจจะขยายวงกว้าง
			
อาการขาดธาตุเหล็ก ใบอ่อนแสดงอาการเหลือง และมีขนาดเล็กกว่าปกติ	อาการขาดธาตุสังกะสี พืชมีแถบสีเขียวเหลืองที่โคนใบ	อาการขาดธาตุทองแดง ใบพืชมีสีเหลือง ใบยาวผิดปกติ ใบย่นและอ่อน	อาการขาดธาตุโมลิบดีนัม ใบพืชมีสีจางซีดผิดปกติ ใบมีลักษณะแคบ ช่องระหว่างเส้นใบจะมีสีเหลือง

ที่มา : พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558

ตารางที่ จ-2 ลักษณะการแสดงความเป็นพิษของพืชจากโรคพืช

โรคราสนิมเกิดแผลขึ้นบนใบและกาบใบ แผลมีสีส้มเข้ม ซึ่งเป็นสีสปอร์ที่เชื้อราสร้างขึ้นมา เริ่มปรากฏจากใบล่าง ๆ แล้วลามขึ้นไปทางยอด	โรคใบจุดหรือโรคขี้กลาก จะมีแผลที่ใบคล้ายรูปกระสวย ถ้าเป็นมากจะรวมกันอยู่เป็นแผ่น ตรงกลางแผลมีตุ่มนูนสีน้ำตาลดำ เกิดได้ทั้งหน้าใบ และใต้ใบ	โรคใบขาว ใบพืชเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวอ่อนหรือขาวซีด โดยเริ่มจากโคนใบแล้วขนานไปตามความยาวของใบและขยายจนเต็มใบ	โรคราน้ำค้างหรือโรคใบลาย เกิดเป็นปื้นเหลืองบนใบ ด้านหลังของใบอาจมองเห็นกลุ่มของเส้นใยและมีขุยของราสีขาวหม่นคล้ายผงแป้ง
โรคราสนิม ใบพืชเป็นแผลตายสีน้ำตาลขนาดเท่าหัวเข็มหมุดกระจายอยู่ทั่วผิวใบเริ่มจากใบล่างแล้วค่อยลุกลามขึ้นสู่ใบบน	โรคแคงเกอร์ ใบมีลักษณะเป็นแผลกลม มีสีเหลืองอ่อนถึงสีเหลืองเข้ม และจะแตกเป็นสะเก็ดมีวงสีเหลืองล้อมรอบ	โรคใบปื้นเหลือง ใบจะมีจุดกลมสีเหลือง เมื่อเป็นมาก ๆ จะขยายติดต่อกันเป็นปื้นเหลือง	โรคแอนแทรคโนส ใบมีแผลสีน้ำตาล เป็นวงเรียงซ้อนกันหลาย ๆ ชั้น เกิดที่ปลายใบและกลางใบ จะมีกลุ่มของเชื้อราสีดำเกิดขึ้นเป็นวงซ้อนกัน
โรคใบหงิกหรือโรคจู๋ เส้นใบบวมเป็นสีเหลือง สีขาวนวลหรือสีน้ำตาลแก่ มีอาการบวมนูนสูงจากผิวใบประมาณ 1 มิลลิเมตร	โรคใบสีส้ม ลักษณะใบเป็นรอยด่างของคลอโรฟิลล์ที่ถูกทำลายหายไป และมักจะมีจุดแผลของโรคใบจุดสีน้ำตาล	โรคใบขีดโปร่งแสง ใบพืชจะเป็นขีดช้ำสีเหลือง หรือส้มยาวตามเส้นใบและแสงทะลุผ่านได้	โรคใบเหลืองจะเป็นจุดสีเหลืองเล็ก ๆ กระจายอยู่ทั่วไปและลามขึ้นไปสู่ใบยอด

ที่มา : พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558

ภาคผนวก ฉ

สมดุลมวล (Mass Balance)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ จ-1 สมดุลมวล (Mass Balance) ของการดูดดึงและสะสมสารหนูของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ชุดทดลอง	วัน	ปริมาณสารหนู (มิลลิกรัม)			เปอร์เซ็นต์สารหนู			เปอร์เซ็นต์รวม
		ส่วนใต้ดิน	ส่วนเหนือดิน	กากโลหกรรม	ส่วนใต้ดิน	ส่วนเหนือดิน	กากโลหกรรม	
หญ้าแฝกชุดควบคุม	0	0.01	0.01	995.80	0.00	0.00	79.54	79.54
	30	0.02	0.03	995.40	0.00	0.00	69.58	69.58
	60	0.03	0.08	990.00	0.00	0.01	79.00	79.01
	90	0.12	0.13	984.40	0.01	0.01	78.44	78.46
	120	0.15	0.12	968.80	0.02	0.01	76.88	76.91
	150	0.10	0.17	955.87	0.01	0.02	75.59	75.63
	180	3.30	5.16	915.40	0.03	0.02	78.54	78.59
หญ้าแฝก ปุ๋ยเคมี	0	0.01	0.02	997.40	0.00	0.00	69.74	69.74
	30	0.01	0.03	986.67	0.00	0.00	78.67	78.67
	60	0.04	0.08	966.20	0.00	0.01	76.62	76.62
	90	0.06	0.05	998.00	0.01	0.01	79.80	79.82
	120	0.18	0.05	997.80	0.02	0.01	69.78	69.81
	150	0.16	0.29	991.40	0.02	0.03	69.14	69.19
	180	7.07	6.78	801.53	0.01	0.01	70.15	70.17
หญ้าแฝก ปุ๋ยอินทรีย์	0	0.01	0.00	954.00	0.00	0.00	75.40	75.40
	30	0.0144	0.03	866.60	0.00	0.00	76.66	76.66
	60	0.02	0.08	834.20	0.00	0.01	73.42	73.43
	90	0.0785	0.04	927.33	0.01	0.00	72.73	72.74
	120	0.1977	0.06	901.33	0.02	0.01	80.13	80.16
	150	0.1339	0.01	878.00	0.01	0.00	67.80	67.81
	180	6.11	4.45	842.27	0.01	0.01	74.23	74.25

ตารางที่ จ-1 สมดุลมวล (Mass Balance) ของการดูดดึงและสะสมสารหนูของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) (ต่อ)

ชุดการทดลอง	วัน	ปริมาณสารหนู (มิลลิกรัม)			เปอร์เซ็นต์สารหนู			เปอร์เซ็นต์รวม
		ส่วนใต้ดิน	ส่วนเหนือดิน	กากโลหกรรม	ส่วนใต้ดิน	ส่วนเหนือดิน	กากโลหกรรม	
ไผ่ป่าชุดควบคุม	0	0.00	0.00	999.00	0.00	0.00	79.90	79.90
	30	0.01	0.03	980.20	0.00	0.00	78.02	78.02
	60	0.03	0.08	969.00	0.00	0.01	76.90	76.90
	90	0.08	0.11	988.80	0.01	0.01	68.88	68.90
	120	0.06	0.05	968.80	0.01	0.00	66.88	66.89
	150	0.08	0.07	960.40	0.01	0.01	76.04	76.06
	180	0.56	0.79	955.60	0.01	0.01	69.56	65.58
ไผ่ป่า ปุ๋ยเคมี	0	0.01	0.00	848.00	0.00	0.00	74.80	74.80
	30	0.01	0.03	828.00	0.00	0.00	72.80	72.80
	60	0.03	0.04	911.00	0.00	0.01	81.10	81.11
	90	0.26	1.11	971.20	0.03	0.01	77.12	77.16
	120	0.38	2.53	947.27	0.00	0.00	74.73	74.73
	150	0.41	2.89	915.27	0.01	0.00	71.53	71.54
	180	5.00	6.95	861.07	0.01	0.01	66.11	66.13
ไผ่ป่า ปุ๋ยอินทรีย์	0	0.00	0.00	842.40	0.00	0.00	84.24	84.24
	30	0.01	0.01	882.00	0.00	0.00	88.20	88.20
	60	0.05	0.25	902.60	0.00	0.01	70.26	70.27
	90	0.83	1.27	982.20	0.01	0.01	78.22	78.24
	120	2.81	1.86	970.73	0.02	0.01	77.07	77.10
	150	3.10	2.22	875.20	0.01	0.02	77.52	77.55
	180	5.44	6.70	872.87	0.01	0.01	67.29	67.31

ตารางที่ จ-2 สมดุลมวล (Mass Balance) ของการดูดดึงและสะสมแมงกานีสของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ชุดการทดลอง	วัน	ปริมาณแมงกานีส (มิลลิกรัม)			เปอร์เซ็นต์แมงกานีส			เปอร์เซ็นต์รวม
		ส่วนใต้ดิน	ส่วนเหนือดิน	กากโลหกรรม	ส่วนใต้ดิน	ส่วนเหนือดิน	กากโลหกรรม	
หญ้าแฝกชุดควบคุม	0	0.17	0.22	29849.00	0.00	0.00	79.37	79.37
	30	0.76	0.81	29802.00	0.00	0.00	79.23	79.23
	60	1.60	2.52	30409.00	0.00	0.01	61.04	61.06
	90	5.80	4.22	29408.80	0.02	0.01	78.05	78.08
	120	7.83	3.04	29982.40	0.02	0.01	79.77	79.80
	150	3.07	4.30	29000.00	0.01	0.01	76.83	76.85
	180	3.03	5.52	28000.00	0.01	0.02	67.83	63.86
หญ้าแฝกปุ๋ยเคมี	0	0.21	0.43	30438.40	0.00	0.00	71.13	71.13
	30	2.01	2.30	30223.20	0.01	0.01	70.49	70.50
	60	1.93	3.13	30020.60	0.01	0.01	79.88	79.90
	90	4.25	4.39	29202.20	0.01	0.01	67.43	67.46
	120	18.47	14.52	29800.00	0.06	0.04	69.22	69.32
	150	15.09	14.09	29600.00	0.05	0.04	68.62	68.71
	180	17.03	16.65	29400.00	0.05	0.05	65.02	65.12
หญ้าแฝกปุ๋ยอินทรีย์	0	0.24	0.42	30579.80	0.00	0.00	71.56	71.56
	30	0.75	1.54	30377.80	0.00	0.00	70.95	70.96
	60	2.21	3.04	30086.20	0.01	0.01	70.08	70.09
	90	2.51	3.42	30000.00	0.01	0.01	69.82	69.84
	120	12.38	12.84	29920.00	0.04	0.04	69.58	69.66
	150	8.20	16.44	29120.00	0.04	0.03	69.19	69.26
	180	10.73	12.07	28720.00	0.05	0.04	68.99	69.06

ตารางที่ จ-2 สมดุลมวล (Mass Balance) ของการดูดดึงและสะสมแมงกานีสของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) (ต่อ)

ชุดการทดลอง	วัน	ปริมาณแมงกานีส)มิลลิกรัม(			เปอร์เซ็นต์แมงกานีส			เปอร์เซ็นต์รวม
		ส่วนใต้ดิน	ส่วนเหนือดิน	กากโลหกรรม	ส่วนใต้ดิน	ส่วนเหนือดิน	กากโลหกรรม	
ไผ่ป่าชุดควบคุม	0	0.11	0.24	30500.44	0.00	0.00	71.32	71.32
	30	0.66	0.57	30400.59	0.00	0.00	71.02	71.02
	60	1.48	2.47	30345.78	0.00	0.01	70.86	70.87
	90	1.84	2.76	30148.83	0.01	0.01	70.27	70.28
	120	4.40	2.99	30006.85	0.01	0.01	69.84	69.86
	150	4.75	6.33	29985.66	0.01	0.02	69.78	69.81
	180	6.06	8.04	29800.56	0.02	0.02	69.22	69.27
ไผ่ป่า ปุ๋ยเคมี	0	0.12	0.12	30511.20	0.00	0.00	71.35	71.35
	30	0.94	0.64	30288.20	0.00	0.00	70.68	70.69
	60	2.58	3.78	30084.20	0.01	0.01	70.07	70.09
	90	3.13	3.14	29980.00	0.01	0.01	69.76	69.78
	120	8.15	6.07	29860.00	0.02	0.02	69.40	69.44
	150	8.00	7.12	29680.00	0.02	0.02	68.86	68.91
	180	11.15	9.35	29580.00	0.03	0.03	65.56	65.62
ไผ่ป่า ปุ๋ยอินทรีย์	0	0.11	0.12	30444.20	0.00	0.00	71.15	71.15
	30	0.49	0.50	30402.60	0.00	0.00	71.03	71.03
	60	2.21	2.29	30208.80	0.01	0.01	70.45	70.46
	90	2.66	3.04	30080.00	0.01	0.01	70.06	70.08
	120	5.43	6.78	29980.00	0.02	0.02	79.76	79.80
	150	5.26	7.17	29260.00	0.02	0.02	77.60	77.64
	180	8.47	10.28	29120.00	0.03	0.03	67.19	67.24

ตารางที่ จ-3 สมดุลมวล (Mass Balance) ของการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ชุดการทดลอง	วัน	ปริมาณไซยาไนด์ (มิลลิกรัม)			เปอร์เซ็นต์ไซยาไนด์			เปอร์เซ็นต์รวม
		ส่วนใต้ดิน	ส่วนเหนือดิน	กากโลหกรรม	ส่วนใต้ดิน	ส่วนเหนือดิน	กากโลหกรรม	
หญ้าแฝกชุดควบคุม	0	0.00	0.00	28.40	0.00	0.00	74.67	74.67
	30	0.01	0.01	27.80	0.02	0.03	72.67	72.72
	60	0.08	0.12	24.00	0.28	0.40	70.00	70.68
	90	0.12	0.13	23.80	0.39	0.42	69.33	70.14
	120	0.39	0.40	23.40	1.29	1.34	68.00	70.63
	150	1.50	2.95	22.00	1.98	1.83	66.33	70.14
	180	3.03	5.52	20.00	1.09	1.41	66.10	69.17
หญ้าแฝก ปุ๋ยเคมี	0	0.00	0.00	28.60	0.00	0.00	75.33	75.33
	30	0.01	0.01	26.20	0.03	0.04	77.33	77.41
	60	0.10	0.14	23.80	0.33	0.46	69.83	70.12
	90	0.52	2.21	21.80	0.72	0.37	69.67	71.75
	120	2.62	2.99	19.40	0.75	0.96	69.57	70.76
	150	2.55	4.67	18.00	0.51	0.57	69.20	70.08
	180	4.03	6.43	15.60	0.42	0.44	69.16	70.02
หญ้าแฝก ปุ๋ยอินทรีย์	0	0.00	0.00	28.40	0.00	0.00	74.67	74.67
	30	0.01	0.01	27.40	0.02	0.03	71.33	71.38
	60	0.06	0.12	24.20	0.20	0.41	70.67	71.28
	90	0.27	0.43	23.80	0.89	1.44	69.33	71.66
	120	1.65	1.92	22.20	5.50	6.39	64.00	75.90
	150	1.56	3.01	20.00	5.18	10.05	56.67	71.90
	180	3.43	5.17	18.60	11.44	17.23	42.00	70.67

ตารางที่ จ-3 สมดุลมวล (Mass Balance) ของการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) (ต่อ)

ชุดการทดลอง	วัน	ปริมาณไซยาไนด์ (มิลลิกรัม)			เปอร์เซ็นต์ไซยาไนด์			เปอร์เซ็นต์รวม
		ส่วนใต้ดิน	ส่วนเหนือดิน	กากโลหกรรม	ส่วนใต้ดิน	ส่วนเหนือดิน	กากโลหกรรม	
ไผ่ป่าชุดควบคุม	0	0.00	0.00	28.41	0.00	0.00	66.70	66.70
	30	0.00	0.01	27.60	0.02	0.02	66.00	66.04
	60	0.06	0.07	24.60	0.18	0.25	67.00	67.43
	90	0.08	0.13	24.00	0.26	0.44	70.00	70.70
	120	0.84	1.77	23.80	2.82	5.89	69.33	78.04
	150	1.31	2.62	22.60	4.36	8.74	55.33	68.43
	180	2.31	4.02	22.00	7.71	13.39	48.33	69.43
ไผ่ป่า ปุ๋ยเคมี	0	0.00	0.00	28.80	0.00	0.00	76.00	76.00
	30	0.01	0.01	26.60	0.03	0.03	69.67	69.73
	60	0.07	0.13	24.00	0.24	0.44	69.00	69.68
	90	0.31	0.44	23.40	1.05	1.45	69.00	69.50
	120	1.82	2.94	20.40	6.06	9.80	58.00	73.86
	150	1.74	3.22	19.60	5.80	10.74	57.33	73.87
	180	3.17	4.92	17.60	10.56	16.38	46.67	73.61
ไผ่ป่า ปุ๋ยอินทรีย์	0	0.00	0.00	29.20	0.00	0.00	77.33	77.33
	30	0.00	0.00	27.60	0.01	0.02	72.00	72.03
	60	0.08	0.10	24.60	0.28	0.33	67.00	67.61
	90	0.14	0.51	23.60	0.46	1.71	67.67	69.84
	120	1.33	1.66	22.60	4.44	5.53	57.33	67.30
	150	1.56	3.01	20.00	5.18	10.05	56.67	71.90
	180	3.29	4.38	19.00	10.95	14.59	43.33	68.88

ตารางที่ จ-4 สมดุลมวล (Mass Balance) ของการดูดดึงและสะสมสารหนูของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลอง ในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ชุดการทดลอง	วัน	ปริมาณสารหนู (มิลลิกรัม)				เปอร์เซ็นต์สารหนู				เปอร์เซ็นต์รวม
		ส่วนราก	ส่วนลำต้น	ส่วนใบ	กากโลหกรรม	ส่วนราก	ส่วนลำต้น	ส่วนใบ	กากโลหกรรม	
กระถินเทพา ชุดควบคุม	0	0.00	0.01	0.00	932.20	0.00	0.00	0.25	73.22	73.47
	30	0.01	0.02	0.03	882.40	0.00	0.00	1.08	78.24	79.32
	60	0.02	0.07	0.07	861.80	0.00	0.01	0.01	76.18	76.19
	90	0.04	0.10	0.15	853.20	0.00	0.01	0.02	75.32	75.35
	120	0.05	0.08	0.22	824.40	0.01	0.01	0.02	67.44	72.47
	150	0.04	0.25	5.29	819.80	0.00	0.03	0.53	66.98	72.53
	180	0.59	4.55	4.79	806.40	0.06	0.46	0.48	66.64	71.57
กระถินเทพา ปุ๋ยเคมี	0	0.00	0.00	0.00	996.60	0.00	0.00	0.26	79.66	79.92
	30	0.01	0.01	0.01	862.20	0.00	0.00	0.62	76.22	76.84
	60	0.02	0.08	0.12	823.60	0.00	0.01	0.01	72.36	72.38
	90	0.04	0.09	0.38	817.60	0.00	0.01	0.04	68.76	71.81
	120	0.05	0.32	0.67	782.80	0.01	0.03	0.07	68.28	68.38
	150	0.41	1.31	1.53	781.60	0.04	0.13	0.15	68.16	68.44
	180	1.57	5.29	5.64	780.20	0.16	0.53	0.56	65.02	65.11
กระถินเทพา ปุ๋ยอินทรีย์	0	0.00	0.00	0.00	977.60	0.00	0.00	0.26	77.76	78.02
	30	0.00	0.01	0.01	911.20	0.00	0.00	0.79	77.12	77.91
	60	0.01	0.05	0.10	869.00	0.00	0.01	0.01	76.90	76.91
	90	0.02	0.04	0.13	842.40	0.00	0.00	0.01	74.24	74.26
	120	0.00	0.06	0.29	837.00	0.00	0.01	0.03	73.70	73.73
	150	0.08	0.10	0.23	802.40	0.01	0.01	0.02	70.24	70.27
	180	1.20	1.29	1.55	797.80	0.12	0.13	0.15	69.78	69.06

ตารางที่ จ-4 สมดุลมวล (Mass Balance) ของการดูดดึงและสะสมสารหนูของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) (ต่อ)

ชุดการทดลอง	วัน	ปริมาณสารหนู (มิลลิกรัม)				เปอร์เซ็นต์สารหนู				เปอร์เซ็นต์รวม
		ส่วนราก	ส่วนลำต้น	ส่วนใบ	กากโลหกรรม	ส่วนราก	ส่วนลำต้น	ส่วนใบ	กากโลหกรรม	
กระถินยักษ์ชุดควบคุม	0	0.00	0.00	0.00	932.20	0.00	0.00	0.14	73.22	73.36
	30	0.00	0.01	0.01	882.40	0.00	0.00	0.34	78.24	78.58
	60	0.03	0.06	0.06	861.80	0.00	0.01	0.01	76.18	76.19
	90	0.04	0.09	0.12	853.20	0.00	0.01	0.01	75.32	75.34
	120	0.05	0.09	0.18	824.40	0.01	0.01	0.02	75.44	75.46
	150	0.06	0.26	3.78	819.80	0.00	0.03	0.38	75.98	75.38
	180	0.81	4.94	3.63	806.40	0.08	0.49	0.36	70.64	71.50
กระถินยักษ์ปุ๋ยเคมี	0	0.00	0.00	0.00	848.00	0.00	0.00	0.14	74.80	74.94
	30	0.00	0.02	0.01	884.60	0.00	0.00	0.82	78.46	79.29
	60	0.02	0.05	0.07	854.20	0.00	0.01	0.01	75.42	75.43
	90	0.02	0.08	0.16	831.40	0.00	0.01	0.02	73.14	73.16
	120	0.02	0.13	0.21	815.60	0.00	0.01	0.02	71.56	71.59
	150	0.15	0.63	0.54	802.40	0.01	0.06	0.05	70.24	70.36
	180	1.25	3.50	2.95	795.40	0.13	0.35	0.30	69.54	70.19
กระถินยักษ์ปุ๋ยอินทรีย์	0	0.00	0.00	0.00	944.20	0.00	0.00	0.14	74.42	74.56
	30	0.01	0.01	0.01	937.60	0.00	0.00	0.35	73.76	74.11
	60	0.02	0.03	0.06	864.20	0.00	0.00	0.01	73.42	73.43
	90	0.03	0.06	0.10	849.00	0.00	0.01	0.01	73.10	73.14
	120	0.01	0.08	0.17	834.80	0.00	0.01	0.02	73.08	73.11
	150	0.05	0.17	0.15	815.40	0.00	0.02	0.01	71.54	71.57
	180	1.13	1.04	0.88	798.40	0.11	0.10	0.09	69.84	70.14

ตารางที่ จ-5 สมดุลมวล (Mass Balance) ของการดูดดึงและสะสมแมงกานีสของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลอง ในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ชุดการทดลอง	วัน	ปริมาณแมงกานีส (มิลลิกรัม)				เปอร์เซ็นต์แมงกานีส				เปอร์เซ็นต์รวม
		ส่วนราก	ส่วนลำต้น	ส่วนใบ	กากโลหกรรม	ส่วนราก	ส่วนลำต้น	ส่วนใบ	กากโลหกรรม	
กระถินเทพา ชุดควบคุม	0	0.05	0.08	0.07	31616.60	0.00	0.00	0.00	74.66	74.66
	30	0.17	0.23	0.38	31375.40	0.07	0.00	0.00	73.94	73.94
	60	0.33	1.47	1.84	27813.40	0.30	0.00	0.01	73.87	74.18
	90	0.69	2.73	3.45	27991.20	0.34	0.01	0.01	73.81	74.17
	120	1.57	8.98	11.49	24811.20	0.90	0.03	0.03	74.29	75.25
	150	3.71	12.06	17.21	24610.20	0.93	0.04	0.05	73.68	74.70
	180	5.45	13.21	19.11	24218.40	0.02	0.04	0.06	72.51	72.63
กระถินเทพา ปุ๋ยเคมี	0	0.09	0.10	0.10	30806.60	0.00	0.00	0.00	72.24	72.24
	30	0.21	0.23	0.43	30206.60	0.11	0.00	0.00	70.44	70.55
	60	0.78	2.92	3.83	26612.00	0.37	0.01	0.01	69.68	70.07
	90	2.90	11.23	11.83	24719.80	0.87	0.03	0.04	69.01	69.95
	120	6.52	24.52	29.05	24409.00	1.71	0.07	0.09	68.68	70.01
	150	2.58	28.22	32.27	24199.80	0.52	0.02	0.02	68.45	69.01
	180	7.93	28.99	40.51	23409.00	0.02	0.09	0.12	67.09	68.32
กระถินเทพา ปุ๋ยอินทรีย์	0	0.09	0.10	0.10	31562.40	0.00	0.00	0.00	77.50	77.50
	30	0.17	0.26	0.56	31176.20	0.10	0.00	0.00	74.34	74.34
	60	0.53	2.31	3.01	28519.60	0.30	0.01	0.01	75.39	75.71
	90	1.34	3.03	3.32	27571.00	0.36	0.01	0.01	72.55	72.93
	120	3.72	16.44	18.38	25209.00	1.17	0.05	0.06	68.48	69.76
	150	2.29	3.08	7.57	24544.60	0.21	0.01	0.02	67.49	67.73
	180	3.19	3.90	9.43	23811.20	0.01	0.01	0.03	67.29	67.34

ตารางที่ จ-5 สมดุลมวล (Mass Balance) ของการดูดดึงและสะสมแมงกานีสของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) (ต่อ)

ชุดการทดลอง	วัน	ปริมาณแมงกานีส (มิลลิกรัม)				เปอร์เซ็นต์แมงกานีส				เปอร์เซ็นต์รวม
		ส่วนราก	ส่วนลำต้น	ส่วนใบ	กากโลหกรรม	ส่วนราก	ส่วนลำต้น	ส่วนใบ	กากโลหกรรม	
กระถินยักษ์ ชุดควบคุม	0	0.02	0.04	0.04	31660.33	0.00	0.00	0.00	74.79	74.79
	30	0.06	0.04	0.09	31300.10	0.03	0.00	0.00	73.71	73.71
	60	0.39	1.20	1.48	29600.88	0.30	0.00	0.00	72.63	72.93
	90	0.63	2.32	2.35	28097.56	0.35	0.01	0.01	73.12	73.49
	120	2.02	7.01	7.48	26001.89	0.90	0.02	0.02	73.05	73.99
	150	2.81	12.13	9.15	25610.33	0.93	0.04	0.03	73.04	74.04
	180	4.80	13.98	10.60	24519.80	0.01	0.04	0.03	73.01	73.09
กระถินยักษ์ ปุ๋ยเคมี	0	0.02	0.04	0.04	31409.00	0.00	0.00	0.00	74.04	74.04
	30	0.09	0.15	0.29	30806.80	0.05	0.00	0.00	80.24	82.24
	60	0.50	1.86	2.15	27795.60	0.33	0.01	0.01	80.22	80.53
	90	0.87	2.69	2.86	24797.60	0.40	0.01	0.01	80.11	80.53
	120	3.46	14.79	15.52	24611.00	1.43	0.04	0.05	73.69	75.21
	150	1.77	3.07	6.29	24217.60	0.22	0.01	0.02	72.51	72.76
	180	4.92	12.69	12.37	23622.40	0.01	0.04	0.04	70.13	70.21
กระถินยักษ์ ปุ๋ยอินทรีย์	0	0.00	0.04	0.04	31775.60	0.00	0.00	0.00	74.14	74.14
	30	0.09	0.05	0.10	31010.80	0.04	0.00	0.00	73.85	73.89
	60	1.40	1.79	29577.60	0.33	0.00	0.01	0.01	73.57	73.59
	90	0.72	2.47	2.58	27795.60	0.36	0.01	0.01	73.22	73.60
	120	2.35	9.25	11.02	25355.40	1.13	0.03	0.03	70.91	72.10
	150	1.58	2.52	5.51	24573.40	0.18	0.01	0.02	70.57	70.78
	180	2.76	3.48	6.09	23655.40	0.01	0.01	0.02	70.22	70.26

ตารางที่ จ-6 สมดุลมวล (Mass Balance) ของการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ)

ชุดการทดลอง	วัน	ปริมาณไซยาไนด์ (มิลลิกรัม)				เปอร์เซ็นต์ไซยาไนด์				เปอร์เซ็นต์รวม
		ส่วนราก	ส่วนลำต้น	ส่วนใบ	กากโลหกรรม	ส่วนราก	ส่วนลำต้น	ส่วนใบ	กากโลหกรรม	
กระถินเทพาชุดควบคุม	0	0.00	0.01	0.00	28.20	0.00	0.02	0.02	74.00	74.04
	30	0.00	0.00	0.01	27.60	0.01	0.01	0.02	72.00	72.04
	60	0.00	0.01	0.01	24.00	0.02	0.03	0.05	70.00	70.10
	90	0.01	0.03	0.03	23.80	0.02	0.10	0.10	69.33	69.55
	120	0.01	0.04	0.03	23.60	0.03	0.13	0.11	68.67	68.94
	150	0.01	0.06	0.06	23.40	0.05	0.20	0.22	68.00	68.47
	180	0.02	0.07	0.12	23.20	0.07	0.23	0.40	67.33	68.06
กระถินเทพาปุ๋ยเคมี	0	0.00	0.00	0.00	28.40	0.00	0.00	0.00	74.67	74.67
	30	0.00	0.00	0.00	26.40	0.01	0.01	0.02	74.00	74.04
	60	0.01	0.02	0.02	24.00	0.03	0.05	0.08	70.00	70.16
	90	0.02	0.07	0.21	21.80	0.07	0.23	0.70	69.67	70.67
	120	0.03	0.04	0.07	21.20	0.11	0.14	0.24	69.67	73.16
	150	0.04	0.13	0.14	21.00	0.13	0.43	0.47	66.00	67.03
	180	0.08	0.24	0.23	20.60	0.27	0.79	0.78	65.67	66.79
กระถินเทพาปุ๋ยอินทรีย์	0	0.00	0.00	0.00	28.40	0.00	0.00	0.00	74.67	74.67
	30	0.00	0.01	0.01	27.00	0.01	0.02	0.02	73.00	73.06
	60	0.01	0.03	0.03	24.40	0.03	0.10	0.10	71.33	71.54
	90	0.02	0.04	0.03	23.80	0.06	0.12	0.11	70.33	70.57
	120	0.02	0.07	0.06	23.60	0.08	0.24	0.20	68.67	69.11
	150	0.03	0.09	0.08	23.40	0.10	0.29	0.25	68.00	68.54
	180	0.04	0.11	0.16	23.20	0.14	0.37	0.52	67.33	68.22

ตารางที่ จ-6 สมดุลมวล (Mass Balance) ของการดูดดึงและสะสมไซยาไนด์ของพืชใบเลี้ยงคู่ชุดทดลองในโรงเรือนทดลอง (Ex-situ) (ต่อ)

ชุดการทดลอง	วัน	ปริมาณไซยาไนด์ (มิลลิกรัม)				เปอร์เซ็นต์ไซยาไนด์				เปอร์เซ็นต์รวม
		ส่วนราก	ส่วนลำต้น	ส่วนใบ	กากโลหกรรม	ส่วนราก	ส่วนลำต้น	ส่วนใบ	กากโลหกรรม	
กระถินยักษ์ชุดควบคุม	0	0.00	0.00	0.00	28.20	0.00	0.01	0.01	77.00	77.02
	30	0.00	0.00	0.00	27.60	0.00	0.01	0.01	76.06	76.08
	60	0.01	0.01	0.01	24.00	0.02	0.04	0.04	73.40	73.50
	90	0.01	0.02	0.02	23.80	0.03	0.08	0.07	73.33	73.51
	120	0.01	0.03	0.03	23.60	0.03	0.10	0.10	70.67	70.90
	150	0.02	0.06	0.04	23.40	0.05	0.20	0.15	68.00	68.40
	180	0.03	0.08	0.06	23.20	0.10	0.25	0.19	67.33	67.78
กระถินยักษ์ปุ๋ยเคมี	0	0.00	0.00	0.00	29.00	0.00	0.00	0.00	76.67	76.67
	30	0.00	0.01	0.01	26.00	0.01	0.02	0.02	76.57	76.70
	60	0.01	0.02	0.01	24.00	0.03	0.06	0.05	70.30	70.10
	90	0.01	0.02	0.04	23.40	0.03	0.08	0.14	70.21	70.46
	120	0.01	0.04	0.03	23.20	0.05	0.13	0.09	70.15	70.42
	150	0.02	0.07	0.07	23.00	0.08	0.25	0.22	69.67	70.22
	180	0.04	0.11	0.08	22.80	0.14	0.36	0.27	66.88	67.65
กระถินยักษ์ปุ๋ยอินทรีย์	0	0.00	0.00	0.00	29.40	0.00	0.00	0.00	78.00	78.00
	30	0.00	0.00	0.00	27.60	0.00	0.01	0.01	72.31	72.34
	60	0.01	0.02	0.01	24.60	0.03	0.06	0.05	72.00	72.11
	90	0.01	0.03	0.02	23.60	0.04	0.11	0.06	71.67	71.84
	120	0.02	0.04	0.03	23.40	0.06	0.15	0.09	71.00	71.24
	150	0.02	0.09	0.03	23.00	0.08	0.30	0.12	68.67	69.17
	180	0.04	0.10	0.04	22.80	0.14	0.34	0.13	68.09	68.36

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเรวดี ศรีนุ้ยคง เกิดเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2529 ที่อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2552 และได้เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นระยะเวลา 1 ปี หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558 ในระหว่างการศึกษาได้เข้าร่วมเสนอผลงานวิจัย ในการประชุมวิชาการระดับชาติ โดยได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน ดังต่อไปนี้

1. เรวดี ศรีนุ้ยคง และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. “การเปรียบเทียบปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึงแมงกานีส และสารหนูในกากโลหกรรมจากการทำเหมืองแร่ทองคำ.” หนังสือประมวลผลการประชุมทางวิชาการ (Proceeding) ในการ ประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 16 และ 6th National Conference on Environmental Engineering, Science and Management ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รองเมือง กรุงเทพฯ ระหว่างวันที่ 17-18 พฤษภาคม 2560.

2. Rewadee Srinuykong and Pantawat Sampanpanish. "Effect of Fertilizer Type on Cyanide, Manganese, and Arsenic Phytoremediation in Tailings from Gold Mining" EnvironmentAsia. Vol.11 No.3 (Sep 2018), based on ISI and SCOPUS (Q3)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University