การลดการสะสมโลหะหนักในถั่วเหลืองที่ปลูกในดินปนเปื้อนที่ปรับปรุงด้วยหินปูนและซีพิโอไลท์

REDUCTION OF HEAVY METAL ACCUMULATION IN SOYBEAN PLANTED ON CONTAMINATED SOIL AMENDED WITH LIMESTONE AND SEPIOLITE

ธาริณี ขามเกาะ
TARINEE KHAMKO

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561

KMITL-2018-SC-M-016-003

การลดการสะสมโลหะหนักในถั่วเหลืองที่ปลูกในดินปนเปื้อนที่ปรับปรุงด้วยหินปูนและซีพิโอไลท์

REDUCTION OF HEAVY METAL ACCUMULATION IN SOYBEAN PLANTED ON CONTAMINATED SOIL AMENDED WITH LIMESTONE AND SEPIOLITE

ธาริณี ขามเกาะ

TARINEE KHAMKO

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561

KMITL-2018-SC-M-016-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REDUCTION OF HEAVY METAL ACCUMULATION IN SOYBEAN PLANTED ON CONTAMINATED SOIL AMENDED WITH LIMESTONE AND SEPIOLITE

TARINEE KHAMKO

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY

DEPARTMENT OF CHEMSTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018
KMITL-2018-SC-M-016-003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2018

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดการสะสมโลหะหนักในถั่วเหลืองที่ปลูกในดินปนเปื้อนที่ปรับปรุงด้วยหินปูนและซีพิโอไลท์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวธาริณี ขามเกาะ
รหัสประจำตัว	57605043
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของหินปูนและซีพิโอไลท์ที่มีผลต่อการสะสมโลหะหนักในดินและถั่วเหลือง ทำการทดลองโดยการสังเคราะห์ดินปนเปื้อนโลหะหนักความเข้มข้นสังกะสี (Zn) 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตะกั่ว (Pb) 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทองแดง (Cu) 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และแคดเมียม (Cd) 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ผสมลงในดิน แล้วผสมหินปูนและซีพิโอไลท์ในอัตราส่วนหินปูนต่อซีพิโอไลท์ 1:0, 0:1, 1:1 และ 2:1 ผสมสารปรับปรุงดังกล่าวลงในดินในเป็นปริมาณ 0.2%, 0.4% และ 0.8% ทำการศึกษาการสกัดลำดับขั้นของดินผสมสารปรับปรุงดินทั้งก่อนและหลังการปลูกถั่วเหลือง หลังการเก็บเกี่ยวทำการศึกษาปริมาณโลหะหนักในราก+ลำต้น และเมล็ด การเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากรากสู่เมล็ด และปัจจัยการสะสมทางชีวภาพ พบว่ารูปฟอร์มส่วนใหญ่ของตะกั่ว ทองแดง สังกะสีพบในรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (F4) แคดเมียมส่วนใหญ่พบในส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (F2) การใช้หินปูนและซีพิโอไลท์ทำให้ปริมาณของโลหะหนักในถั่วเหลืองลดลง เมื่อในดินมีการปนเปื้อนตะกั่วในปริมาณต่ำและมีการปนเปื้อนทองแดง แคดเมียม สังกะสี ในปริมาณสูง ควรเลือกเติมหินปูน:ซีพิโอไลท์ อัตราส่วน 1:1 ในปริมาณ 0.2% แต่ถ้าดินมีการปนเปื้อนตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม ในปริมาณสูง และมีการปนเปื้อนสังกะสีในปริมาณต่ำ ควรเลือกเติมหินปูน:ซีพิโอไลท์ อัตราส่วน 2:1 ในปริมาณ 0.4% การเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากรากสู่เมล็ด พบว่าสังกะสี > ทองแดง > แคดเมียม > ตะกั่ว ตามลำดับ การเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากดินไปสะสมในถั่วเหลือง พบว่าถั่วเหลืองสามารถดูดแคดเมียมได้มากที่สุด รองลงมาคือ สังกะสี ทองแดง และตะกั่ว ตามลำดับ

คำสำคัญ : หินปูน ซีพิโอไลท์ โลหะหนัก ถั่วเหลือง ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Reduction of Heavy Metal Accumulation in Soybean Planted on Contaminated Soil Amended with Limestone and Sepiolite
Student Name	Ms. Tarinee Khamko
Student ID	57605043
Degree	Master of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
Year	2018
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Chompoonut Chaiyaraksa

Abstract

This study investigated the influence of limestone and sepiolite on heavy metal accumulation in soils and soybean. Soil was synthesized to contaminate with zinc 150 mg/kg, lead 150 mg/kg, copper 100 mg/kg, and cadmium 1 mg/kg. The contaminated soil was mixed with limestone and sepiolite in the ratio of 1:0, 0:1, 1:1, and 2:1. The amount of soil modifier added to soil was 0.2%, 0.4%, and 0.8%. Sequential extraction method and metal determination were performed on soil both before and after soybean planting. Metals in root, stem, and seed were determined. The study was also on metal translocate from root to seed and on bioaccumulation factor. The results showed that most of lead, copper, and zinc were found in iron and manganese oxide form. However, most cadmium was found in the exchangeable form. Using of limestone and sepiolite resulted in a reduction of metals accumulated in soybean. For soil containing a low concentration of lead but a high concentration of copper, cadmium, and zinc, the mixture of limestone and sepiolite (1:1) was recommended to mix with soil with the amount of 0.2%. For soil containing a low concentration of zinc but a high concentration of copper, cadmium, and lead, the mixture of limestone and sepiolite (2:1) was recommended to mix with soil with the amount of 0.4%. Zinc could translocate from root to seed more than copper, lead, and zinc, respectively. From studying of the movement of metals from soil to accumulate in soybean, it was found that soybean could absorb the highest amount of cadmium, followed by zinc, copper, and lead, respectively.

Keywords: limestone, sepiolite, heavy metals, soybean, soil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและได้รับคำปรึกษาที่ดีจากหลายบุคคล จึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุวรรณี จรรยาพูน ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ ผศ.ดร. วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ และ ดร. เสาวภาค สุขตระกูลเวศ อาจารย์กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณอาจารย์ บุคลากร ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีการเกษตร สาขาพืชไร่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองและสถานที่ในการเพาะปลูก

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยแนะนำและให้กำลังใจที่ดีทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายขอขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ที่คอยสนับสนุนเงินทุน เข้าใจและให้กำลังใจตลอดมา

นางสาวธาริณี ขามเกาะ

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย........ ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ........ ข
กิตติกรรมประกาศ........ ค
สารบัญ........ ง
สารบัญตาราง........ ช
สารบัญรูป........ ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์........ ฏ
บทที่ 1 บทนำ........ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา........ 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย........ 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย........ 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ........ 2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง........ 3
2.1 สารปรับปรุงดิน........ 3
2.1.1 คุณสมบัติและประโยชน์ของสารปรับปรุงดิน........ 3
2.2 โลหะหนัก........ 6
2.2.1 แหล่งกำเนิดของโลหะหนัก........ 6
2.2.2 การสะสมของโลหะหนัก........ 6
2.2.3 ตะกั่ว........ 7
2.2.4 แคดเมียม........ 11
2.2.5 สังกะสี........ 12
2.2.6 ทองแดง........ 12
2.3 ดิน........ 13
2.3.1 เนื้อดิน........ 13
2.3.2 อนุภาคของดิน........ 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การจำแนกประเภทเนื้อดิน ... 15
2.3.4 ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ... 15
2.3.5 ค่าความเป็นกรดด่าง ... 16
2.3.6 ความเค็มของดิน ... 17
2.3.7 อินทรียวัตถุในดิน ... 17
2.3.8 น้ำในดิน ... 18
2.3.9 ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ... 18
2.3.10 ลักษณะดินจังหวัดฉะเชิงเทรา ... 23
2.4 ถั่วเหลือง ... 24
2.4.1 ความสำคัญของถั่วเหลือง ... 24
2.4.2 พฤกษศาสตร์ถั่วเหลือง ... 24
2.4.3 พันธุ์ถั่วเหลือง ... 25
2.4.4 การปลูกการดูแลรักษาและการเก็บเกี่ยวถั่วเหลือง ... 26
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ... 29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย ... 32
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี ... 32
3.1.1 อุปกรณ์ ... 32
3.1.2 สารเคมี ... 32
3.2 ตัวอย่างดินและพืช ... 34
3.2.1 ดินที่ใช้เพาะกล้า ... 34
3.2.2 ดินที่ใช้ปลูกพืช ... 34
3.2.3 สารปรับปรุงดิน ... 35
3.2.4 พืชทดลอง ... 35
3.2.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์ดินปนเปื้อนโลหะ ... 35
3.3 การดำเนินการทดลอง ... 36
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างดินและการวิเคราะห์ ... 36
3.3.2 การเตรียมตัวอย่างพืชสำหรับการวิเคราะห์ ... 36
3.3.3 ขั้นตอนการปลูกถั่วเหลือง และบันทึกผล ... 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล 37
3.4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ 37
3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก 37
3.4.3 ปัจจัยการสะสมทางชีวภาพ 38
3.4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ 38
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล 39
4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน 39
4.1.1 สมบัติทั่วไป 39
4.1.2 สมบัติของสารปรับปรุงดิน 40
4.1.3 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดด่างในดินหลังเติมสารปรับปรุงดิน 42
4.2 ผลผลิตของถั่วเหลือง 44
4.3 การเจริญเติบโตของถั่วเหลือง 45
4.3.1 ความสูงของต้นถั่วเหลือง 45
4.3.2 จำนวนฝัก 47
4.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสารปรับปรุงดินต่อการลดลงของโลหะหนักในถั่วเหลือง 49
4.4.1 ตะกั่ว 49
4.4.2 ทองแดง 51
4.4.3 แคดเมียม 53
4.4.4 สังกะสี 55
4.5 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้น 59
4.5.1 ตะกั่ว 59
4.5.2 ทองแดง 61
4.5.3 แคดเมียม 63
4.5.4 สังกะสี 65
4.6 การวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก 68
4.7 ปัจจัยการสะสมทางชีวภาพ 69
4.8 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 สมดุลมวล (Mass balance) ... 71

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ... 72

5.1 สรุปผลการวิจัย ... 72

5.2 ข้อเสนอแนะ ... 73

บรรณานุกรม ... 74

ภาคผนวก ... 80

ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์ดินและพืช ... 81

ภาคผนวก ข ผลวิเคราะห์ดินเบื้องต้น ... 90

ภาคผนวก ค ผลการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง ... 94

ภาคผนวก ง ผลโลหะหนักในดินและพืช ... 100

ภาคผนวก จ ผลวิเคราะห์ปัจจัยการสะสมทางชีวภาพและการเคลื่อนย้ายโลหะหนัก ... 128

ภาคผนวก ฉ ผลวิเคราะห์ทางสถิติ ... 137

ภาคผนวก ช สมดุลมวล (Mass balance) ... 141

ประวัติผู้เขียน ... 150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เกณฑ์ในการจัดกลุ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคดิน	14
3.1 เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดิน ทั้งก่อนและหลังการปลูกถั่วเหลือง	36
4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน	40
4.2 ปริมาณโลหะหนักและค่าความเป็นกรดด่างของสารปรับปรุงดิน	41
4.3 ผลการวิเคราะห์สารปรับปรุงดิน ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)	41
4.4 ขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนของสารปรับปรุงดิน	42
4.5 ค่าความเป็นกรดด่างในดินหลังเติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน: ซีพีโอไลท์) ในอัตราส่วนต่างๆ	43
4.6 น้ำหนักแห้งของเมล็ดถั่วเหลืองที่ปลูกในดินปนเปื้อนโลหะหนักและใส่สารปรับปรุงดิน อัตราส่วนต่างๆ	44
4.7 อัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เหมาะสมที่ทำให้โลหะหนักทุกชนิดในเมล็ดมีค่าน้อยที่สุด และที่ไม่เกินค่ามาตรฐานอาหาร	57
4.8 การเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากรากสู่เมล็ดถั่วเหลืองที่ปลูกในดินฉะเชิงเทราผสม สารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ	68
4.9 การเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากดินสู่ถั่วเหลืองที่ปลูกในดินฉะเชิงเทราผสมสารปรับปรุงดิน ในอัตราส่วนต่างๆ	69
4.10 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เหมาะสม	70
ข-1 ขนาดอนุภาคของดินตัวอย่าง	90
ข-2 ค่าความชื้นของดินตัวอย่าง	90
ข-3 ค่าความเป็นกรดด่างของดินตัวอย่าง	91
ข-4 ค่าความหนาแน่นของดินตัวอย่าง	91
ข-5 ค่าการนำไฟฟ้าของดินตัวอย่าง	91
ข-6 ค่าการแลกเปลี่ยนประจุของดินตัวอย่าง	91
ข-7 ปริมาณของสารอินทรีย์ของดินตัวอย่าง	91
ข-8 ปริมาณไนโตรเจนของดินตัวอย่างปริมาณ	91
ข-9 ปริมาณฟอสฟอรัสของดินตัวอย่าง	92
ข-10 โพแทสเซียมของดินตัวอย่าง	92
ข-11 ปริมาณโลหะหนักในดินตัวอย่าง	92
ค-1 ความสูงของต้นถั่วเหลือง	95
ค-2 จำนวนฝักของต้นถั่วเหลือง	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค-3 น้ำหนักเมล็ดแห้ง........ 99
ง-1 ผลตะกั่วในถั่วเหลือง........ 101
ง-2 ผลทองแดงในถั่วเหลือง........ 103
ง-3 ผลแคดเมียมในถั่วเหลือง........ 105
ง-4 ผลสังกะสีในถั่วเหลือง........ 107
ง-5 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงก่อนปลูกพืชของตะกั่ว........ 109
ง-6 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงหลังปลูกพืชของตะกั่ว........ 111
ง-7 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงก่อนปลูกพืชของทองแดง........ 113
ง-8 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงหลังปลูกพืชของทองแดง........ 115
ง-9 ผลการสกัดลำดับขั้นในปรับปรุงดินก่อนปลูกพืชของแคดเมียม........ 117
ง-10 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงหลังปลูกพืชของแคดเมียม........ 119
ง-11 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงก่อนปลูกพืชของสังกะสี........ 121
ง-12 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงหลังปลูกพืชของสังกะสี........ 123
จ-1 ผล BAF ในตะกั่ว........ 129
จ-2 ผล TF ในตะกั่ว........ 130
จ-3 ผล BAF ในทองแดง........ 131
จ-4 ผล TF ในทองแดง........ 132
จ-5 ผล BAF ในแคดเมียม........ 133
จ-6 ผล TF ในแคดเมียม........ 134
จ-7 ผล BAF ในสังกะสี........ 135
จ-8 ผล TF ในสังกะสี........ 136
ฉ-1 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของตะกั่วในเมล็ดถั่วเหลือง........ 137
ฉ-2 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของทองแดงในเมล็ดถั่วเหลือง........ 138
ฉ-3 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของแคดเมียมในเมล็ดถั่วเหลือง........ 139
ฉ-4 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของสังกะสีในเมล็ดถั่วเหลือง........ 140
ช-1 ข้อมูลสมดุลมวล (Mass balance) ของตะกั่ว........ 142
ช-2 ข้อมูลสมดุลมวล (Mass balance) ของทองแดง........ 144
ช-3 ข้อมูลสมดุลมวล (Mass balance) ของแคดเมียม........ 146
ช-4 ข้อมูลสมดุลมวล (Mass balance) ของสังกะสี........ 148

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของซีพิโอไลท์	5
2.2 ไดอะแกรมสามเหลี่ยมแจงประเภทเนื้อดิน	15
2.3 ส่วนประกอบของเมล็ดถั่วเหลือง	26
3.1 ดินผสม ตราละโว้	34
3.2 แปลงดินจังหวัดฉะเชิงเทรา	34
3.3 หินปูนและซีพิโอไลท์	35
4.1 ความสูงของต้นถั่วเหลืองที่ปลูกในดินฉะเชิงเทราปนเปื้อนโลหะหนักและปรับปรุงดินด้วยหินปูน: ซีพิโอไลท์ในอัตราส่วน 1:0 (a), 0:1 (b), 1:1 (c) และ 2:1 (d)	46
4.2 จำนวนฝักของต้นถั่วเหลืองที่ปลูกในดินฉะเชิงเทราปนเปื้อนโลหะหนักและปรับปรุงดินด้วยหินปูน: ซีพิโอไลท์ในอัตราส่วน 1:0 (a), 0:1 (b), 1:1 (c) และ 2:1 (d)	48
4.3 ปริมาณตะกั่วในราก (a) ต้น+ใบ (b) และเมล็ด (C) ของถั่วเหลืองเมื่อเติมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ	49
4.4 ปริมาณทองแดงในราก (a) ต้น+ใบ (b) และเมล็ด (C) ของถั่วเหลืองเมื่อเติมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ	51
4.5 ปริมาณแคดเมียมในราก (a) ต้น+ใบ (b) และเมล็ด (C) ของถั่วเหลืองเมื่อเติมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ	53
4.6 ปริมาณสังกะสีในราก (a) ต้น+ใบ (b) และเมล็ด (C) ของถั่วเหลืองเมื่อเติมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ	55
4.7 สัดส่วนรูปฟอร์มตะกั่วในดินก่อนและหลังปลูกพืชที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้น 6 ขั้นตอน	60
4.8 สัดส่วนรูปฟอร์มทองแดงในดินก่อนและหลังปลูกพืชที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้น 6 ขั้นตอน	62
4.9 สัดส่วนรูปฟอร์มแคดเมียมในดินก่อนและหลังปลูกพืชที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้น 6 ขั้นตอน	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10 สัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีในดินก่อนและหลังปลูกพืชที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้น 6 ขั้นตอน 66

ง-1 กราฟมาตรฐานของแคดเมียมทั้งหมดของดินและพืช 125

ง-2 กราฟมาตรฐานของตะกั่วทั้งหมดของดินและพืช 125

ง-3 กราฟมาตรฐานของทองแดงทั้งหมดของดินและพืช 126

ง-4 กราฟมาตรฐานของสังกะสีทั้งหมดของดินและพืช 126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

°C	องศาเซลเซียส
mg/kg	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
AAS	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชั่นสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
cm	เซนติเมตร
%	เปอร์เซ็นต์
g/kg	กรัมต่อกิโลกรัม
ppm	หนึ่งส่วนในล้านส่วน
CEC	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ
EC	ค่าการนำไฟฟ้า
OM	สารอินทรีย์
XRF	เครื่องเอ็กซเรย์ฟลูออเรสเซนต์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ทำให้มีการใช้สารเคมีจำนวนมาก รวมถึงโลหะหนัก (heavy metals) ซึ่งเป็นสารมลพิษ มีการนำโลหะหนักหลายชนิดไปใช้ประโยชน์ทั้งด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมโดยเฉพาะตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี จากการใช้ประโยชน์โลหะหนักอย่างกว้างขวาง ทำให้เกิดปัญหาการแพร่กระจายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม โดยสาเหตุของการปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่ เกิดจากการที่เกษตรกรใช้สารเคมีกำจัดแมลงหรือวัชพืช โรงงานอุตสาหกรรมปล่อยน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักปนเปื้อน โดยไม่มีการบำบัดหรือการบำบัดไม่มีประสิทธิภาพดีพอที่จะกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งได้ ทำให้โลหะหนักปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะแหล่งน้ำ พื้นที่ดิน และพื้นที่เพาะปลูกอื่นๆ ทำให้โลหะหนักสามารถแพร่กระจายเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร เป็นปัญหาสำคัญในการจัดการและกำจัดทิ้ง และหากไม่มีวิธีจัดการโลหะหนักที่ถูกต้อง อาจก่อให้เกิดภาวะมลพิษต่อดินและสิ่งมีชีวิตในดิน ซึ่งเป็นเหตุให้การใช้ประโยชน์จากที่ดินนั้นถูกจำกัดลง ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาเพื่อหาวิธีที่ถูกต้องในการจัดการดิน ซึ่งมีหลายวิธีเช่น การขุดและฝังกลบดิน การล้างดิน การปลูกพืชบำบัด (Suthar *et al.*, 2013) และการใช้วิธีทางชีวภาพ (Chang *et al.*, 2013) แต่วิธีดังกล่าวค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายที่สูง จึงได้มีการศึกษาวิธีที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายไม่มาก โดยการใช้วัสดุปรับปรุงดินซึ่งส่วนใหญ่จะเน้นไปในเรื่องของการลดความสามารถของโลหะหนักในการเคลื่อนที่โดยการทำให้เกิดการดูดซับ (sorption) การตกตะกอน (precipitation) หรือการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) กับวัสดุปรับปรุงดินตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น (Shi *et al.*, 2013) ทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ทำให้โลหะหนักเหล่านี้อยู่ในรูปที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ วัสดุปรับปรุงดินที่ใช้มีหลายชนิดเช่น วัสดุฟอสเฟต (Sun *et al.*, 2016) ปูนขาว (Gray *et al.*, 2006) อินทรีย์วัตถุ (Park *et al.*, 2011) แร่ซีพิโอไลท์ (Abad-Valle *et al.*, 2016) หินปูน (Basta and McGowen, 2004) และแร่ซีโอไลต์ (Friesl *et al.*, 2003) ซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาไม่สูงนัก โดยการใช้วัสดุดังกล่าวเหล่านี้เพื่อปรับปรุงสภาพดินปนเปื้อนในปัจจุบันถือเป็นวิธีทางเลือกที่เป็นไปได้ในเชิงปฏิบัติ

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาความเหมาะสมและคุณสมบัติของหินปูนและซีพิโอไลท์สำหรับปลูกถั่วเหลือง ซึ่งในปัจจุบันถั่วเหลืองได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ และรัฐบาลได้มีการส่งเสริมให้ปลูกถั่วเหลืองหลังจากการเก็บเกี่ยวข้าวในฤดูแล้ง โดยผสมหินปูนและซีพิโอไลท์ลงในดินที่อัตราส่วนแตกต่างกัน เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้สารปรับปรุงดินสามารถยับยั้งการดูดซับโลหะหนักในถั่วเหลืองได้มากที่สุด นอกจากนี้ยังศึกษาการสะสมโลหะหนักในถั่วเหลือง เพื่อให้เป็นประโยชน์ในการแก้ไขปัญหาโลหะหนักในการปลูกพืชชนิดอื่นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้หินปูนและซีพิโอไลท์สามารถยับยั้งการดูดซับโลหะหนักของถั่วเหลืองได้มากที่สุด

2) ศึกษาค่าการเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากรากไปยังเมล็ด (TF) และการสะสมทางชีวภาพ (BAF)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) เก็บตัวอย่างดินจาก จ.ฉะเชิงเทรา ทำการเตรียมตัวอย่างดิน (อบ บด และร่อนผ่านตะแกรง) ก่อนนำไปวิเคราะห์และทดลองในขั้นตอนต่อไป

2) ศึกษาคุณสมบัติของดิน โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์ ดังนี้ ความหนาแน่นรวมของดิน (bulk density, Db) ขนาดอนุภาคดิน (Particle size) ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ความชื้น (Moisture) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation Exchange Capacity, CEC) การนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC) อินทรียวัตถุ (Organic matter, OM) ไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P) โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Available K)

3) ทำการสังเคราะห์ดิน โดยการเตรียมโลหะสังกะสี (Zn) 150 mg/kg ตะกั่ว (Pb) 150 mg/kg ทองแดง (Cu) 100 mg/kg และแคดเมียม (Cd) 1 mg/kg ผสมลงในดิน บ่มเป็นเวลา 1 เดือน (อ้างอิงจากระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนโลหะหนักในดินของประเทศไทย)

4) ศึกษาปริมาณสังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) และแคดเมียม (Cd) ในวัสดุปลูกในรูปต่างๆ โดยใช้การสกัดลำดับขั้นทั้งก่อนและหลังปลูก

5) ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของหินปูนและซีพิโอไลท์ต่อการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง (ทำการเพาะกล้าแล้วย้ายกล้าลงในดินผสมโลหะหนักและสารปรับปรุงดิน) โดยแปรผันอัตราส่วนของหินปูน: ซีพิโอไลท์ (1:0, 0:1, 1:1, 2:1) ในอัตราส่วนต่างๆ กันโดยแปรผันอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินต่อดินในปริมาณ 0, 0.2, 0.4 และ 0.8 % (w/w) ทดลอง 3 ซ้ำ ในแต่ละอัตราส่วน สังเกตการเจริญเติบโตจากความสูง จำนวนฝักทุกสัปดาห์ หลังจากการเก็บเกี่ยวทำการชั่งน้ำหนักแห้งของเมล็ด วัดโลหะในราก ลำต้นและใบรวมกัน และเมล็ดแห้ง

6) ศึกษาการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก (Translocation factor, TF) ในพืช ศึกษาปัจจัยการสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation factor, BAF)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) เป็นแนวทางในการลดผลกระทบโลหะหนักในดินปนเปื้อนที่มีต่อถั่วเหลือง

2) เป็นแนวทางในการลดปัญหาการสะสมโลหะในพืชชนิดอื่นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารปรับปรุงดิน (Soil Amendments)

สารปรับปรุงดินเป็นสารที่ได้จากธรรมชาติ สารสังเคราะห์ หรือสารเคมี ทั้งในรูปสารประกอบอินทรีย์หรือสารประกอบอนินทรีย์ที่มีการปรุงแต่ง หรือไม่มีการปรุงแต่ง หรืออาจอยู่ในรูปของผลพลอยได้จากการประกอบการต่างๆ โดยทั่วไปในการใช้สารปรับปรุงดินนั้นมักมีวัตถุประสงค์ และตัวสารปรับปรุงดินเองก็มีสมบัติเหมาะสมต่อการแก้ปัญหาสมบัติทางกายภาพของดินมากกว่าการปรับปรุงสมบัติทางเคมีและความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหารพืชในดิน ดังนั้นสารปรับปรุงดินส่วนมากจึงไม่ใช่สารบำรุงดินที่จะมีผลต่อการเพิ่มพูนธาตุอาหารพืชโดยตรง แต่บางชนิดก็อาจมีคุณสมบัติที่เหมาะสม ต่อการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน และบำรุงความอุดมสมบูรณ์ของดินไปพร้อมกัน เช่น สารปรับปรุงดินในรูปของสารอินทรีย์ที่เป็นผลพลอยได้ทางการเกษตรและอยู่ในรูปที่สลายตัวง่ายและเร็ว มีธาตุอาหารพืชสูง เช่น กากเมล็ดนุ่น เมล็ดฝ้าย กากละหุ่ง กระดูกป่น ฯลฯ หรือเป็นสารอินทรีย์ฯ ที่มีธาตุอาหารพืชต่ำแต่มีการใช้ในปริมาณมาก เช่น เปลือกมันค้างปี กากอ้อย เป็นต้น

การจำแนกประเภทของสารปรับปรุงดินขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่กำหนดในการจำแนกเป็นสำคัญ ยกตัวอย่าง เช่น ถ้าจะจำแนกประเภทของสารปรับปรุงดินตามลักษณะองค์ประกอบของตัวสาร สารปรับปรุงดินอาจจะจำแนกได้ 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้ (ปิยะ, 2553)

1) สารอนินทรีย์หรือสารเคมี ได้แก่ สารปรับปรุงดินในรูปหินหรือแร่ตามธรรมชาติที่ไม่มีการปรุงแต่งโดยใช้ความร้อน เช่น วัสดุปูนไลม์ ยิบซั่ม แร่พูไมซ์ แร่ซีโอไลท์ รวมทั้งสารเคมีที่สังเคราะห์ขึ้น เช่น สารประกอบแคลเซียม โพลีซัลไฟท์ หรือสารที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ฟอสโฟยิบซั่ม เป็นต้น

2) สารอินทรีย์ ได้แก่ สารอินทรีย์ตามธรรมชาติที่ไม่มีการปรุงแต่งหรือมีการปรุงแต่ง เช่น เศษซากพืช ปุ๋ยหมัก ฯลฯ ผลพลอยได้ทางการเกษตรโดยตรงและจากโรงงานอุตสาหกรรมทั้งในและนอกภาคการเกษตร เช่น ขุยมะพร้าว แกลบดิน เปลือกมันค้างปี กากอ้อย กากน้ำตาล สารฮิวมัสและจีเอ็มแอล (GML) จากโรงงานผงชูรส กากกระดาษ ฯลฯ รวมทั้งสารอินทรีย์สังเคราะห์ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยขบวนการทางเคมี เช่น สารโพลีอครีลามีด (หรือ PAM) สารดูดน้ำโพลีเมอร์ สารประกอบแอมโมเนียซัลเฟต เป็นต้น

3) สารอนินทรีย์ผสมสารอินทรีย์ ได้แก่ สารปรับปรุงดินที่ผลิตขึ้นโดยผสมวัสดุปรับปรุงดินในรูปสารอนินทรีย์ลงในสารอินทรีย์ เพื่อเพิ่มคุณค่าของตัวสารหรือเพื่อการใช้ประโยชน์แบบผสมผสาน เช่น การผลิตปุ๋ยหมักโดยการผสมปุ๋ยเคมี และแร่พูไมซ์เข้าด้วยกัน หรือการผลิตสารปรับปรุงดินเพื่อใช้ประโยชน์ในลักษณะเอนกประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 คุณสมบัติและประโยชน์ของสารปรับปรุงดิน

2.1.1.1 หินปูน (limestone)

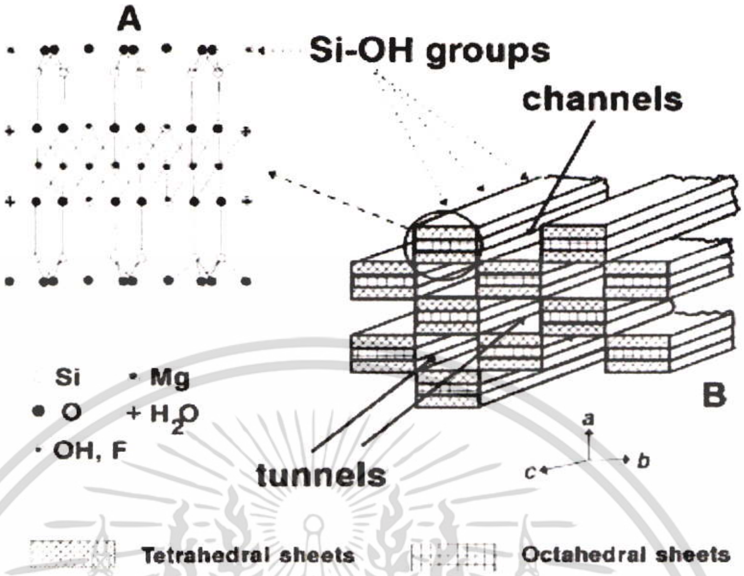
หินปูนเป็นอนินทรีย์สารที่เกิดจากการทับถมของตะกอนคาร์บอเนตในแหล่งน้ำธรรมชาติ มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำมีสมบัติเฉพาะ ไม่เป็นพิษ และมีความเสถียรทางเคมี จึงนิยมนำไปใช้เป็นวัตถุดิบพื้นฐานที่สำคัญในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ใช้เป็นตัวเติม (filler) ในอุตสาหกรรมพลาสติก ยาง กระดาษ และสี หินปูนยังใช้เป็นสารที่ควบคุมในการผลิตของอุตสาหกรรมเหล็กกล้าและวัตถุที่ทำจากเหล็ก (Wang *et al*., 2007) หินปูนมีโครงสร้างผลึก 3 แบบ คือ แคลไซต์ (calcite) อะราโกไนต์ (aragonite) และวาเทอร์ไรต์ (vaterite) ซึ่งแคลไซต์เป็นโครงสร้างผลึกที่เสถียรที่สุดและวาเทอร์ไรต์จะมีความเสถียรน้อยที่สุด (Nan *et al*., 2008) โดยทั่วไปหินปูนหรือปูนขาวใช้ในการปรับสภาพดินที่เป็นกรด และมีหลากหลายงานวิจัยที่ได้นำหินปูนหรือปูนขาวมาใช้ลดปริมาณแคดเมียมและตะกั่วในส่วนของพืชที่สามารถบริโภคได้ ซึ่งจะช่วยเพิ่มการดูดซับโลหะหนัก โดยลดความความเข้มข้น H^+ และเพิ่มประจุไอออนลบ การใช้วัสดุที่เป็นด่าง เช่น ปูนขาว และโคลนแดง ช่วยเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักในรูปฟอร์มที่เหลือตกค้างในดิน โดยการเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างของปูนขาวและโคลนแดงมีผลทำให้โลหะหนักตกตะกอน (Garau *et al*., 2007) การฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยใช้ปูนขาวผสมกับโคลนแดงสามารถช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างและลดการเคลื่อนที่สู่สิ่งมีชีวิตของโลหะหนักได้ ปูนขาวสามารถรวมกับสารปรับปรุงดินชนิดอื่นๆ เพื่อลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก เมื่อเติมปูนขาวในดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก ซึ่งปูนขาวเป็นที่รู้จักดีที่สามารถช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างในดิน และสามารถทำให้โลหะหนักตกตะกอนในรูปคาร์บอเนต ออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ และช่วยลดการละลายของโลหะหนัก (Castaldi *et al*., 2005)

2.1.1.2 ซีพิโอไลท์ (*sepiolite*)

ซีพิโอไลท์อาจจัดเป็นพวกโครงสร้างเป็นชนิดแบบ 2:1 แตกต่างจากแร่ดินเหนียวซิลิเกตชนิดอื่นๆ ตรงที่กลุ่มของ tetrahedral ของแต่ละแผ่นไม่ได้ชี้ไปทิศทางเดียวกันคือมีทั้งชี้ขึ้นชี้ลง การสลับแบบนี้ทำให้แผ่น tetrahedral ถูกแบ่งเป็นแถบที่มีความกว้างแตกต่างกัน ซีพิโอไลท์เป็น Mg-silicate ที่มีอลูมินัมเป็นส่วนน้อย ซึ่งอาจเป็นเพราะแร่ชนิดนี้อยู่ระหว่างชนิด dioctrahedral และ trioctrahedral จึงทำให้มีลักษณะเป็นเส้น ซึ่งเป็นผลมาจากหลายๆ แถบขนานตามยาวกับแกนและประกอบด้วย ribbon ที่มีโครงสร้างประเภท 2:1 สลับกัน ซึ่งในซีพิโอไลท์มีแปดตำแหน่งต่อกันสามเส้น ถึงแม้ว่าแผ่น tetrahedral จะเรียงต่อกัน แต่ยอดในแต่ละแถบชี้ไปยังด้านตรงข้าม ซีพิโอไลท์พบว่ามีแมกนีเซียมบรรจุอยู่ในตำแหน่งทั้งแปด ใน octahedral ดังนั้นประมาณ 90-100% ของตำแหน่ง tetrahedral ที่ถูกใช้จะมีแมกนีเซียมอยู่ ส่วนอลูมิเนียมในแผ่น tetrahedral มีตั้งแต่ 0.04-1.08 ต่อ 12 ตำแหน่งที่เป็นไปได้ (อัญชลี, 2534) ซีพิโอไลท์ไม่บวมตัว มีน้ำหนักเบา เป็นดินที่มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ มีพื้นที่ผิวที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งแตกต่างจากดินอื่นๆ โดยที่อนุภาคของซีพิโอไลท์มีสัณฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมือนเข็ม พื้นที่ผิวและความพรุนสูง รวมทั้งรูปร่างอนุภาคของดินเหมาะสำหรับการดูดซับที่โดดเด่น และคุณสมบัติคอลลอยด์ที่ทำให้มันเป็นวัสดุที่มีประโยชน์และมีความหลากหลายสำหรับการใช้งาน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของซีพิโอไลท์ (Eduardo, 2001)

จากการศึกษาแร่ดินเหนียวทั้งหมด พบว่าซีพิโอไลท์เป็นที่ยอมรับและได้รับความสนใจในการดูดซับโลหะหนัก เช่น แคดเมียม สังกะสี ทองแดง และตะกั่ว (Padilla-Ortega *et al*., 2013) ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ซีพิโอไลท์เพื่อตรึงโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน ผลของการฟื้นฟูโดยใช้ซีพิโอไลท์มีหลากหลายการศึกษาวิจัยที่ทดลองในพื้นที่จริงหรือในแปลงทดลอง ซึ่งซีพิโอไลท์มีข้อดีคือสามารถฟื้นฟูแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินนาที่เป็นกรดสำหรับพื้นที่ขนาดจริง ซีพิโอไลท์ยังมีประสิทธิภาพสูง มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย ราคาถูก และสามารถใช้ได้ง่าย โดยอาจใช้ซีพิโอไลท์เดี่ยวๆ หรือรวมกับวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น หินปูน ก็สามารถช่วยลดปริมาณแคดเมียมในข้าวกล้องได้ (Yi *et al*., 2017) ซีพิโอไลท์สามารถช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างในดินนาที่เป็นกรดและลดรูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ง่ายในดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก (Liang *et al*., 2015) สามารถช่วยลดปริมาณโลหะหนักในผัก เช่น ผักโขม ผักกาดหอม และหัวไชท้าว (Liang *et al*., 2014) ดังนั้นการรวมซีพิโอไลท์กับวัสดุอื่นๆ เช่น หินปูน ปุ๋ยฟอสเฟต และไบโอชาร์ ทำให้มีผลดีต่อการตรึงโลหะหนักในดินอย่างมีนัยสำคัญ (Liang *et al*., 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โลหะหนัก (Heavy metal)

โลหะเป็นธาตุที่มีทั้งคุณและโทษต่อสิ่งมีชีวิต โลหะที่เป็นพิษต่อระบบชีวภาพ เรียกว่า โลหะหนัก ตามนิยามแล้วโลหะหนักคือสารที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 และ 5 และเมื่อพิจารณาตำแหน่งบนตารางธาตุ ซึ่งโลหะหนักได้แก่ ธาตุที่มีเลขอะตอมระหว่าง 22 - 23 และ ระหว่าง 40 - 52 รวมทั้งธาตุในกลุ่มแลนทาไนด์ (lanthanide series) และกลุ่ม แอคติไนด์ (actinide series) และสารมีผลต่อระบบชีวเคมีของพืชและสัตว์ (มลิวรรณ, 2544)

โลหะหนักมีทั้งหมด 22 ชนิดได้แก่ ทองแดง เงิน ทองคำ ทองคำขาว สังกะสี ตะกั่ว ดีบุก โครเมียม ทังสเตน แคดเมียม ปรอท บิสมัส พลวง ไททาเนียม แทนทาลัม โคบอลต์ ยูเรเนียม นิเกิล แมงกานีส โมลีเดียม และเบอร์มัสเนียม

2.2.1 แหล่งกำเนิดของสารโลหะหนัก

แหล่งกำเนิดของสารโลหะหนักที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะที่สำคัญ คือ (มลิวรรณ, 2544)

1) แหล่งอุตสาหกรรม โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำ ดังนั้นโอกาสที่โลหะหนักซึ่งปนเปื้อนกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทจะถูกถ่ายเทลงในแหล่งน้ำจึงเป็นไปได้สูง โดยอาจจะสะสมอยู่ในดินตะกอน และบางส่วนจะถูกพัดเคลื่อนย้ายลงสู่ทะเล โรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้แก่ โรงงานชุบโลหะ โรงงานฟอกย้อมและสิ่งทอ โรงงานฟอกหนังสัตว์ โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โรงงานผลิตสารเคมี โรงงานแบตเตอรี่ และถ่านไฟฉาย เป็นต้น

2) แหล่งเกษตรกรรม ประเทศไทยเป็นแหล่งเกษตรกรรม อาชีพ และรายได้ของประชากรจึงเกี่ยวข้องกับการเพาะปลูกไม่ว่าจะเป็นการทำนา ทำไร่ หรือทำสวน จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลผลิตต่อพื้นที่ ประกอบกับลักษณะภูมิประเทศที่อยู่ในแถบร้อนชื้น แมลง และเชื้อโรคต่าง ๆ ที่เป็นศัตรูพืชจึงเจริญได้ดี จึงต้องมีการนำยากำจัดศัตรูพืชมาใช้ ส่งผลทำให้เกิดมียากำจัดศัตรูพืชตกค้างอยู่ในพื้นที่เกษตรกรรมมากขึ้น ทั้งนี้ยากำจัดศัตรูพืชหลายชนิดมีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบอยู่ เช่น ยากำจัดเชื้อรา มีทองแดงเป็นองค์ประกอบอยู่ เป็นต้น ซึ่งยากำจัดศัตรูพืชส่วนใหญ่สลายตัวยาก และสารพิษตกค้างเหล่านี้จะถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำเมื่อเกิดการกัดเซาะหน้าดินโดยน้ำฝน

3) แหล่งชุมชน เป็นแหล่งก่อให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำได้มาก โดยส่วนใหญ่เป็นโลหะหนักที่ปนมากับสิ่งปฏิกูล เช่น ขยะมูลฝอยต่างๆ ซึ่งมีชิ้นส่วนวัสดุที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบอยู่ เช่น กระดาษ สีทาบ้าน ถ่านไฟฉาย หม้อแบตเตอรี่รถยนต์และเศษภาชนะที่เคลือบด้วยโลหะ เป็นต้น

2.2.2 การสะสมของโลหะหนัก

สารพิษโลหะหนักต่าง ๆ เมื่ออยู่ในแหล่งน้ำจะสะสมอยู่กับตัวกลาง เช่น ดินตะกอน พืชน้ำ สัตว์น้ำ หรือแขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างอิสระได้ในปริมาณต่างๆ กัน ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่ปะปนหรือสะสมอยู่ในตัวกลางเหล่านี้สามารถที่จะเปลี่ยนรูปหรือเคลื่อนย้ายไปตามห่วงโซ่อาหารได้ ลักษณะการสะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการเคลื่อนย้ายในตัวกลางแต่ละชนิดในแหล่งน้ำสามารถแยกรายละเอียดได้ดังนี้ (โสภาพรรณ, 2534)

1) การสะสมของโลหะหนักในน้ำ โลหะหนักที่สะสมในแหล่งน้ำมีทั้งในรูปที่ละลายน้ำ และอยู่ในรูปสารแขวนลอย ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำมีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา เนื่องจากความสามารถในการผสมผสานของสารแขวนลอยพวกที่ละลายน้ำแตกต่างกัน โดยพวกที่อยู่ในรูปแขวนลอยจะมีเวลาอยู่ในน้ำยาวนานกว่าพวกที่ละลายน้ำ

2) การสะสมโลหะหนักในดินตะกอน การสะสมโลหะหนักในดินตะกอนส่วนหนึ่งเป็นโลหะหนักที่เกิดจากการสะสมตามธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ การชะล้างพวกเกลือแร่ที่อยู่บนพื้นดินลงสู่แหล่งน้ำ หรือโลหะหนักที่เป็นส่วนประกอบของแร่ที่มีอยู่ในธรรมชาติบริเวณนั้นตามสภาพทางธรณีวิทยา แล้วละลายออกมาปะปนอยู่ในน้ำได้ และอีกส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการใช้และการปล่อยโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำอันเป็นผลมาจากการทำกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์โดยทั่วไปโลหะหนักสามารถเกิดการสะสมอยู่ในดินตะกอนโดยมีปริมาณความเข้มข้นสูงกว่าที่มีอยู่ในน้ำมาก เนื่องจากมีขบวนการเข้ามาเกี่ยวข้องทั้งทางด้านเคมี ฟิสิกส์ และชีวภาพ องค์ประกอบในดินตะกอนที่มีผลต่อการสะสมของโลหะหนักได้แก่ พวกคาร์บอเนต ออกไซด์ของแมงกานีสและเหล็ก ตลอดจนองค์ประกอบของสารอินทรีย์ต่างๆ

3) การสะสมของโลหะหนักในพืชน้ำ การสะสมของโลหะหนักในพืชน้ำจะสะสมด้วยการดูดซับจากน้ำโดยตรง ซึ่งพืชน้ำจะไม่สามารถควบคุมปริมาณโลหะหนักในตัวเองได้ปริมาณการสะสมจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลาย หรือแขวนลอยอยู่ในน้ำเป็นสำคัญ รวมถึงอายุของพืชเหล่านั้นด้วย ทั้งนี้พืชน้ำต่างชนิดกันก็จะมีการสะสมของปริมาณโลหะหนักแตกต่างกัน

4) การสะสมของโลหะหนักในสัตว์น้ำ สัตว์น้ำส่วนใหญ่ได้รับสารพิษโลหะหนักเข้าไปด้วยการกินอาหารในลักษณะต่าง ๆ ตามชนิดของสัตว์น้ำนั้น การสะสมของโลหะหนักโดยการดูดซึมจากน้ำเข้าไปโดยตรงเป็นไปได้น้อยมาก การสะสมของโลหะหนักในสัตว์น้ำจะเพิ่มขึ้นตามลำดับการบริโภค

2.2.3 ตะกั่ว (Lead)

ตะกั่ว (Pb) เป็นธาตุที่มีอยู่ในธรรมชาติที่จัดอยู่ในหมู่ที่ IV ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 82 เลขมวล 207.19 จุดหลอมเหลว (melting point) 364 องศาเซลเซียล จุดเดือด (boiling point) 1,797 องศาเซลเซียล ตะกั่วมีสมบัติทางกายภาพและเคมีคล้ายดีบุก ทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย ทนต่อการผุกร่อนได้ดี ละลายน้ำได้น้อย พบในรูปของสารประกอบตะกั่วซัลไฟด์ ตะกั่วซัลเฟต ตัวอย่างแร่ที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ แร่ gelenite หรือ galena ซึ่งเป็นซัลไฟด์ของตะกั่ว (PbS), cerussite ($PbCO_3$), anglesite ($PbSO_4$), minium (Pb_3O_4), wulfenite ($PbMnO_4$), crocite ($PbCrO_4$), ZnS และ pyrite เป็นต้น (เชิดศักดิ์, 2544)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.1 แหล่งกำเนิดตะกั่ว

ตะกั่วสามารถพบได้ทั้งในบรรยากาศทั่วไปในน้ำ ดิน อาหาร ยาแผนโบราณและเครื่องใช้ที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบตะกั่วดังกล่าวมีที่มาจากแหล่งต่างๆ ดังนี้ (ศูนย์ข้อมูลคณะกรรมการประสานงาน องค์กรพัฒนาเอกชนเพื่อสาธารณสุขมูลฐาน)

1) แหล่งประกอบอาชีพ ได้แก่ การทำเหมืองตะกั่ว การถลุงตะกั่ว การนำของเก่าที่มีตะกั่วผสมอยู่มาหลอมใช้ใหม่ การบรรทุกหรือขนถ่ายสิ่งที่มีฝุ่นตะกั่วผสมอยู่ การทำให้ตะกั่วบริสุทธิ์ การผลิตบรอนซ์ตะกั่ว สีตะกั่ว ตะกั่วผงและตะกั่วในรูปอื่นๆ การผลิตแก้วที่มีตะกั่วปนอยู่ การทาสีพ่นสนิม การใช้สารประกอบของตะกั่วในรูปที่เป็นผง ในการผลิตแบตเตอรี่ การเคลือบด้วยสารตะกั่ว การซ่อมหรือตัดโลหะที่มีตะกั่วหรือมีตะกั่วผสมอยู่โดยใช้ความร้อน การตกแต่งเจียระไนหรือขัดมันโลหะที่มีตะกั่วผสมอยู่ การทำเครื่องปั้นดินเผา การทำและบรรจุ สารกำจัดศัตรูพืช การเรียงพิมพ์ การทำเครื่องประดับโลหะ การทำลูกปืน การบัดกรีตะกั่ว การซ่อมหม้อแบตเตอรี่ การหล่อพิมพ์ สำหรับตะกั่วอินทรีย์นั้นอาชีพที่เสี่ยง ได้แก่ อาชีพ เกี่ยวกับการผสมน้ำมันกับตะกั่วอินทรีย์ การเติมน้ำมัน การล้างถังน้ำมัน การซ่อมถังน้ำมัน การใช้น้ำมันเบนซินล้างทำความสะอาดเครื่องยนต์กลไกต่างๆ

2) จากอากาศที่ปนเปื้อนตะกั่ว (airborne Lead) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการหายใจเอาตะกั่วในอากาศนั้นไม่ใช่ทางได้รับตะกั่วที่สำคัญ แต่เป็นแหล่งที่มีตะกั่วปนเปื้อนอยู่ ในอเมริกา พบว่าเด็กที่อาศัยอยู่ในระยะ 100 ฟุต จากถนนสายสำคัญจะมีระดับตะกั่วสูงกว่าเด็กที่อาศัยอยู่ไกลออกไปและระดับตะกั่วสัมพันธ์กับปริมาณการจราจรเฉลี่ยในแต่ละวันของถนนสายสำคัญใกล้บ้าน จากการวิจัยนักเรียนในโรงเรียนประถมเขตกรุงเทพมหานครแต่ละแห่ง ซึ่งตั้งอยู่ในระยะ 5 เมตร 500 เมตร และ 5,000 เมตร มีอัตราป่วยด้วยโรคพิษตะกั่วเรื้อรังสูงกว่าตามระยะห่างตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้สถานีบริการน้ำมันก็เป็นแหล่งที่ทำให้อากาศปนเปื้อนตะกั่วได้

3) จากดินและฝุ่น (Soil and Dust) ดินและฝุ่นได้รับตะกั่ว โดยสะสมจากตะกั่วในอากาศที่ได้รับจากรถยนต์ โรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งอื่นๆ รวมทั้งแผ่นสีเก่าหลุดมาสะสมในดิน ซึ่งตะกั่วที่สะสมจะอยู่ที่บริเวณผิวดิน โดยทั่วไปควรมีตะกั่วปนเปื้อนในดินและฝุ่นไม่เกิน 500-1,000 ppm.

4) แหล่งอาหารและน้ำดื่ม (Food and Drinking Water) พืชที่เจริญเติบโตใกล้ทางสัญจรหรือสถานีบริการน้ำมันจะมีความเข้มข้นของตะกั่วที่สะสมจากตะกั่วในอากาศมากกว่าพืชผลที่เจริญในบริเวณอื่น ตะกั่วสามารถสะสมในอาหาร (จากวัสดุที่นำมาประกอบเป็นอาหาร) ระหว่างกระบวนการผลิตและการขนส่ง อาหารกระป๋องโดยเฉพาะที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะสามารถละลายส่วนที่เป็นตะกั่วจากกระป๋องที่บรรจุได้ ตะกั่วในน้ำดื่มส่วนใหญ่ได้มาจากการละลายของท่อประปาชนิดที่มีตะกั่วผสมอยู่โดยเฉพาะถ้าน้ำดังกล่าวมีฤทธิ์เป็นกรด

5) ถ้วยชามเครื่องเคลือบปนสารตะกั่ว (Lead-Clayed Pottery) ในประเทศสหรัฐอเมริกามีรายงานการเป็นพิษตะกั่วอยู่หลายครั้งจากแหล่งถ้วยชามนี้ เพราะถ้วยชามดังกล่าวสามารถปล่อยตะกั่วจำนวนมากลงในอาหารและเครื่องดื่มได้ โดยเฉพาะภาชนะที่มีการแตกร้าว หรือแม้แต่ที่มีการใช้มากและล้างขัดมาก การใช้ถ้วยชามเซรามิคใส่อาหารเข้าอบในเตาไมโครเวฟก็จะทำให้สารตะกั่วใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเคลือบละลายออกมาปนเปื้อนในอาหารได้เช่นกัน องค์กรอาหารและยาของอเมริกาควบคุมการนำเข้าเซรามิคประเภทภาชนะบรรจุอาหารที่ใช้สารเคลือบปนตะกั่วอย่างเข้มงวด หากสินค้าดังกล่าวมีสารตะกั่วเกินค่ามาตรฐานจะไม่ได้รับอนุญาตให้นำเข้าไปจำหน่ายในอเมริกาได้

6) จากแหล่งที่มีตะกั่วเป็นพื้น (Lead-Base Paint) จากการศึกษาในต่างประเทศรายงานว่าสีที่มีตะกั่วเป็นแหล่งที่ให้ตะกั่วปริมาณสูงสุดแก่ผู้ป่วยเด็กในอเมริกา ในปี พ.ศ.2520 รัฐบาลอเมริกาได้ออกกฎหมายให้สีที่ทาบ้านมีตะกั่วไม่เกินร้อยละ 0.06 (600 ppm) ต่อน้ำหนักสีขณะแห้ง เด็กที่อาศัยอยู่ในบ้านที่ปนเปื้อนด้วยตะกั่วหรือบ้านที่ทาด้วยสีที่มีตะกั่ว ทั้งสีทาภายในและภายนอก เป็นเด็กที่มีความเสี่ยงต่อการได้รับตะกั่ว ยิ่งถ้าสีนั้นเก่าและมีการหลุดลอกด้วยจะเกิดเศษชิ้นเล็กๆและฝุ่นสีที่มีตะกั่วผสมอยู่ด้วยตามพื้น จะทำให้เด็กซึ่งมีพฤติกรรมมือสู่ปาก คือ ชอบหยิบสิ่งของเข้าปากซึ่งจะได้รับตะกั่วเข้าไปสะสมในร่างกายได้

7) จากแหล่งอื่นๆซึ่งสามารถพบตะกั่วในได้อีก เช่น ยาแผนโบราณและยาจีนหลายชนิด การใช้น้ำมันหล่อลื่นบางชนิดที่มีตะกั่วเป็นส่วนประกอบถึงร้อยละ 30 ของเด็กเล่นบางชนิดซึ่งเคลือบสีที่มีสารตะกั่วผสมอยู่ก็อาจเป็นแหล่งหนึ่งที่ทำให้เด็กได้รับตะกั่วได้

2.2.3.2 การดูดซึมตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย

ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ (ศูนย์ข้อมูลคณะกรรมการประสานงาน องค์กรพัฒนาเอกชนเพื่อสาธารณสุขมูลฐาน, 2535)

1) ทางปาก ซึ่งอาจมาจากอาหาร บุหรี่หรือจากที่อื่นๆ ที่เจือปนมากับภาชนะ อาหารน้ำดื่ม ประมาณร้อยละ 5-10 ของตะกั่วที่เข้าทางปาก จะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย เด็กจะดูดซึมตะกั่วได้ดีกว่าผู้ใหญ่

2) ทางการหายใจ ถ้าหายใจเอาควันหรือฟูมของตะกั่วที่หลอมเหลวเข้าไป เช่น การหลอมตะกั่วหรือการเชื่อมโลหะ การดูดซึมจะเร็วมาก แต่ถ้าหายใจเอาตะกั่วที่เป็นอณู (particle) เล็กๆเข้าไป เช่น จากสีเก่าที่หลุดออกมาการดูดซึมจะช้าลง โดยทั่วไปร้อยละ 35-50 ของตะกั่วที่ดูดเข้าไปจะถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด อาการที่เกิดขึ้นมักจะรวดเร็วและรุนแรง

3) ทางผิวหนัง ตะกั่วอินทรีย์สามารถซึมผ่านผิวหนังได้ ส่วนตะกั่วอนินทรีย์ในรูปสารละลายจะซึมผ่านไม่ได้ ยกเว้นมีรอยถลอกบนผิวหนัง

2.2.3.3 ความเป็นพิษของตะกั่วต่อสุขภาพอนามัย

เมื่อเด็กรับประทานขนมเข้าไป ตะกั่วที่ปนเปื้อนอยู่ในขนมจะเข้าไปในระบบทางเดินอาหารและถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดไปสะสมในร่างกาย โดยเด็กจะดูดซึมได้ดีกว่าผู้ใหญ่ประมาณร้อยละ 40 เมื่อเด็กมีสารตะกั่วสะสมอยู่มากถึงระดับหนึ่ง จะแสดงความเป็นพิษออกมา พิษตะกั่วในเด็ก (ศูนย์ข้อมูลคณะกรรมการประสานงาน องค์กรพัฒนาเอกชนเพื่อสาธารณสุขมูลฐาน, 2535)

1) พิษต่อระบบประสาท ตะกั่วจะทำลายระบบประสาทส่วนกลางและระบบประสาทส่วนปลาย ยิ่งอายุน้อยการทำลายยิ่งมากทำให้เป็นอัมพาตได้ ดังนั้นในเด็กเล็กยิ่งมีความอันตราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังทำให้เกิดอาการผิดปกติทางจิตประสาท การวิจัยในออสเตรเลียพบว่าตะกั่วในเลือดทำให้เด็กมีไอคิวต่ำ ปัญญาอ่อน เฉื่อยชาและเกเร

2) ระบบทางเดินปัสสาวะ ตะกั่วจะทำลายไตโดยตรง

3) ระบบเลือด จะทำให้เม็ดเลือดแดงแตกง่าย และขัดขวางการสร้างฮีม

4) พิษต่อหัวใจ ทำให้เกิดกล้ามเนื้อเนื้อหัวใจอักเสบ

5) พิษต่อทางเดินอาหาร ทำให้มีการบีบเกร็งของกล้ามเนื้อเรียบมีอาการปวดหลังและทำลายตับ

6) ตะกั่วขัดขวางการสร้าง Active Vitamin D ที่ตับทำให้เมื่อระดับตะกั่วในเลือดตั้งแต่ 25 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร นอกจากนี้ยังทำให้น้ำหนักลดลงและหยุดการเจริญเติบโตของสมอง

7) ตะกั่วสามารถทำให้โครโมโซมแตกหักหรือเกิดการจัดโครโมโซมใหม่แบบสมมาตร อาจทำให้เซลล์ตายหรือเกิดการสูญหายของชิ้นส่วนโครโมโซมได้ ในขณะแบ่งเซลล์และอาจทำให้เซลล์ในเอ็มบริโอตายในช่วงที่มีการสร้างอวัยวะแล้ว จนมีผลให้ลูกอ่อนในครรภ์ผิดปกติ

2.2.3.4 โรคพิษตะกั่วจำแนกได้ 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

1) โรคพิษตะกั่วเฉียบพลัน (acute lead poisoning) เกิดในผู้ที่ได้รับตะกั่วครั้งแรกๆในปริมาณมาก ส่วนใหญ่พบในผู้หลอมตะกั่ว เด็กคลอดใหม่และเด็กเล็ก ซึ่งผู้ที่ได้รับพิษจากตะกั่วจะมีอาการปวดท้องแบบปวดมาก ชักและตายได้ ในผู้ใหญ่จะมีอาการคอแห้ง กระหายน้ำ ปวดแสบปวดร้อน คลื่นไส้ อาเจียนร่วมด้วย ถ้าตรวจปริมาณตะกั่วในเลือดจะพบตะกั่วในเลือดสูงมาก เช่น 60 ไมโครกรัมต่อเลือด 100 ซี.ซี.

2) โรคพิษตะกั่วเรื้อรัง (chronic lead poisoning) เป็นโรคที่พบมากในผู้ทำงานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ ไอซี ดิสก์และแผงวงจรคอมพิวเตอร์หรือที่คล้ายกัน เนื่องจากผู้รับตะกั่วจะรับทีละน้อย บ่อยๆ เมื่อตรวจตะกั่วในเลือดจะพบตะกั่วในเลือดไม่สูงมาก เช่น อาจพบตั้งแต่ 10 ไมโครกรัมต่อเลือด 100 ซี.ซี. ขึ้นไป

2.2.3.5 การปนเปื้อนตะกั่วในสิ่งแวดล้อม

การใช้ประโยชน์จากตะกั่วเป็นสาเหตุให้เกิดของเสียหรือมีการปลดปล่อยตะกั่วสู่สิ่งแวดล้อม ได้แก่ ดิน น้ำ และอากาศ ซึ่งเป็นที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตและรวมถึงมนุษย์และก่อให้เกิดภาวะสะสมในสิ่งที่มนุษย์บริโภคและเกิดผลกระทบต่อมนุษย์ในที่สุด (สมพูล, 2532)

1) ตะกั่วในดิน ดินเป็นแหล่งใหญ่ที่รองรับตะกั่วทั้งจากแหล่งเคลื่อนที่ การทิ้งขยะจากบ้านเรือนและจากโรงงาน ดินทั่วไปอาจพบตะกั่ว 10-30 ไมโครกรัมต่อกรัม แต่ดินใกล้ถนนที่มีรถยนต์วิ่งจะพบ 100-500 ไมโครกรัมต่อกรัม ดินบริเวณโรงงานที่ใช้ตะกั่วพบได้สูงถึง 40,000 ไมโครกรัมต่อกรัม

2) ตะกั่วในแหล่งน้ำ โดยเฉพาะต้นน้ำส่วนใหญ่จะพบปริมาณตะกั่วเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อผ่านแหล่งเกษตรกรรม ชุมชนและแหล่งอุตสาหกรรมจะพบปริมาณตะกั่วสูงขึ้น มาตรฐานของน้ำที่ใช้เพื่อการบริโภคไม่ควรมีตะกั่วเกินกว่า 50 ไมโครกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ตะกั่วในอากาศส่วนใหญ่เกิดจากการปลดปล่อยของยานพาหนะเป็นเหตุให้ปริมาณตะกั่วในอากาศสูงขึ้นในเมืองใหญ่หรือเมืองที่มีจราจรหนาแน่น มาตรฐานอากาศหายใจโดยทั่วไปไม่ควรมีตะกั่วเกินกว่า 10 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเนื่องจากมีหลักฐานว่าตะกั่วในอากาศมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณในเลือด ตะกั่วที่ปลดปล่อยจากรถยนต์ส่วนใหญ่มีขนาด 0.2-0.4 ไมครอน ซึ่งเป็นขนาดของฝุ่นละอองที่ผ่านสู่ถุงลมในปอดและผ่านสู่กระแสเลือดได้ ฝุ่นละอองเหล่านี้ 25% จะลอยในอากาศและถูกพัดพาไปตามลม ส่วนอีก 75% จะเปลี่ยนแปลงเป็นออกไซด์หรือคาร์บอเนตและรวมตัวเป็นฝุ่นขนาดใหญ่ซึ่งจะตกลงสู่เบื้องล่าง เป็นเหตุให้ดินและน้ำบริเวณใกล้เคียงกับถนนมีตะกั่วปะปนอยู่มาก

2.2.3.6 ผลกระทบของตะกั่วต่อสิ่งแวดล้อม

ปริมาณตะกั่วที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม จะถูกสะสมในดินและแหล่งน้ำ ส่งผลต่อพืชและสัตว์โดยสัตว์สามารถรับสารตะกั่วจากการกินพืชที่ได้รับสารตะกั่วในพื้นดิน ซึ่งพืชและสัตว์ที่ได้รับสารตะกั่วเข้าไปในปริมาณต่ำจะทำให้การเจริญเติบโตช้า และตะกั่วยังส่งผลกระทบต่อสัตว์น้ำ โดยแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนสารตะกั่วจะส่งผลต่อการเจริญพันธุ์ ระบบโลหิต และระบบประสาทของสัตว์น้ำ

2.2.4 แคดเมียม (Cadmium)

ในธรรมชาติแคดเมียมจะเป็นธาตุที่อยู่ร่วมกับสังกะสีและตะกั่ว ดังนั้นในการถลุงแร่จึงได้ธาตุทั้งสามออกมาพร้อมกัน สำหรับแคดเมียมนิยมนำมาทำอัลลอยและเคลือบโลหะต่างๆ ให้ขาวเป็นเงาหรือมีสีบรอน ใช้ทำน้ำมันเครื่องยนต์ ทำสี ใช้ทำให้เกิดแสงฟลูออเรสเซน ใช้ทำแบตเตอรี่ ใช้ทำโพลีไวนิลพลาสติก ใช้ฉาบโลหะเครื่องไฟฟ้า เช่น ลวดสายไฟฟ้า ในทางยาใช้แคดเมียมทำเป็นยาฆ่าจุลินทรีย์และยาฆ่าแมลง แคดเมียมจะไม่อยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ แต่แคดเมียมจะอยู่ในรูปของเกลือต่างๆ ที่มีการละลายน้ำต่างกัน เกลือของแคดเมียม เช่น แคดเมียมไนเตรต แคดเมียมซัลเฟต จะละลายน้ำได้ดี แต่แคดเมียมออกไซด์ แคดเมียมไฮดรอกไซด์และแคดเมียมคาร์บอเนตจะไม่ละลายน้ำ แคดเมียมออกไซด์มีความดันไอสูงจึงระเหยได้ดีและเข้าสู่ร่างกายได้ง่าย การดูดซึมของแคดเมียมพบว่าเมื่อแคดเมียมอยู่ในรูปของฝุ่น ปริมาณของแคดเมียมที่ตกในระบบทางเดินหายใจจะขึ้นกับขนาดและคุณสมบัติในการละลายน้ำของแคดเมียมเอง สำหรับแคดเมียมที่เข้าสู่ร่างกายทางระบบทางเดินอาหาร พบว่าถูกดูดซับได้น้อยมากคือประมาณ ร้อยละ 0.5-12 เท่านั้น แคดเมียมที่เข้าสู่ร่างกายจะไปสะสมในตับและไตเป็นส่วนใหญ่ การขับถ่ายแคดเมียมในคนนั้น แคดเมียมจะถูกขับออกทางปัสสาวะ ความเป็นพิษเกิดจากแคดเมียมไปแทนที่สังกะสีในกระบวนการของเอนไซม์บางอย่างทำให้เอนไซม์ไม่สามารถทำงานได้ อาการพิษที่เกิดจากแคดเมียมมีทั้งแบบฉับพลันและเรื้อรัง อาการพิษเฉียบพลันอันเกิดจากการสูดดมควันของแคดเมียมออกไซด์เข้าไปประมาณ 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีอาการแพ้พิษเกิดขึ้นได้ทันที ได้แก่ จมูกและคออักเสบ เยื่อจมูก ปอด และหลอดลมถูกทำลาย แน่นหน้าอก หายใจขัด ไอมีเลือด ปอดบวมและตายได้ ส่วนอาการเรื้อรังอันเกิดจากการสูดดมผงฝุ่นแคดเมียมหรือรับประทานจะทำให้เกิดโรคที่เรียกว่า อิไต-อิไต โดยผู้ป่วยจะมีอาการปวดร้าวตามข้อตามกระดูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 สังกะสี (Zinc)

สังกะสีเป็นโลหะที่แข็งสีขาวเงินอมฟ้า ละลายได้ดีในกรดแก่และด่างแก่ เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริค คือ ไฮดรอกไซด์ของโลหะประเภทนี้ หากละลายในกรดจะทำให้เกิดแคทอิออน Zn^{2+} หากละลายในเบสจะทำให้เกิด $Zn(OH)_2$ จะละลายน้ำได้น้อยลงเรื่อยๆ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจนถึงพีเอชค่าหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุด และเมื่อพีเอชสูงขึ้นกว่าจุดต่ำสุดนี้แล้ว โลหะแอมโฟเทอริคจะละลายน้ำได้มากขึ้นการปนเปื้อนของสังกะสีในน้ำเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมปล่อยน้ำลงสู่แหล่งน้ำ โดยไม่มีการบำบัดหรือบำบัดไม่ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง หรือจากการทิ้งยาเครื่องสำอาง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากสังกะสีก็จะถูกน้ำชะล้างโดยน้ำฝนลงสู่แหล่งน้ำ ในที่สุดสังกะสีก็สามารถเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารและเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ การเข้าสู่ร่างกายทางการกินจะกัดกร่อนทางเดินอาหารส่วนต้น ได้แก่ หลอดอาหารและกระเพาะอาหาร เมื่อร่างกายได้รับเกลือของสังกะสีที่ละลายน้ำได้ดีโดยการกินเป็นปริมาณ 675-2,280 ppm จะทำให้มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ร่างกายขาดน้ำ ปวดท้องรุนแรง เลือดต่ำ และเสียชีวิตในที่สุด การได้รับเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจเอาฝุ่นของสังกะสีเข้าไปในปริมาณ 1-5 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะเกิดอาการปอดบวม มีไข้หนาวสั่น หายใจขัด ปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ ส่วนการสัมผัสกับฝุ่นของสังกะสีทางผิวหนัง ทำให้เกิดการอุดตันของต่อมไขมันกลายเป็นตุ่มใสๆ ขึ้นมา มีอาการแดงและคัน ถ้าเกาจะอักเสบและกลายเป็นตุ่มหนองได้

2.2.6 ทองแดง (Copper)

ทองแดงเป็นธาตุหมู่ 1B มีเลขอะตอม 29 เลขมวล 63.55 วาเลนซ์อิเล็กตรอน 1 และ 2 มีไอโซโทปที่เสถียร 2 ไอโซโทป เป็นโลหะสีแดง มีความถ่วงจำเพาะ 8.96 จุดหลอมเหลว 1,086 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,565 องศาเซลเซียส นำไฟฟ้าได้ดีรองจากเงิน ทนการกัดกร่อนในอากาศได้ดีกว่าเหล็ก ทองแดงบริสุทธิ์มีความอ่อนปานกลาง ไอของทองแดงเป็นสีเขียว ทำปฏิกิริยากับกำมะถันได้ดีกว่าออกซิเจน ปกติไม่พบในรูปอิสระแต่พบในรูปแร่ และสารประกอบ

2.2.6.1 การเข้าสู่ร่างกายของทองแดง

ทองแดงสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ 2 ทางด้วยกัน คือ

1) ทางเดินอาหาร โดยการรับประทานอาหารที่มีธาตุทองแดงเข้าไป ซึ่งอาหารที่มีทองแดงมากได้แก่ ตับ เห็ด เนื้อสัตว์ อาหารทะเล เช่น หอยนางรม ถั่ว และผลไม้เปลือกแข็งต่าง ๆ เช่น นัท เป็นต้น

2) ทางเดินหายใจ โดยการหายใจเอาฝุ่นของสารประกอบทองแดงและไอทองแดง อันเกิดจากโรงงานหลอมโลหะทองแดง และโลหะผสมของทองแดงเข้าไป ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดอันตรายต่อระบบหายใจได้

2.2.6.2 การเกิดพิษเนื่องจากทองแดง

เนื่องจากร่างกายสามารถควบคุมปริมาณทองแดงได้ และยังสามารถบำบัดทองแดงออกจากร่างกายได้ จึงทำให้เกิดการสะสมของทองแดงในร่างกาย จนเป็นเหตุให้เกิดโรคเรื้อรังได้ ดังเช่นโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อื่นๆ แต่ก็อาจเกิดพิษเนื่องจากทองแดงแบบเฉียบพลันได้ในกรณีที่ร่างกายได้รับทองแดงในปริมาณมากเกินไปทันที โดยร่างกายบำบัดออกไม่ทัน การเกิดพิษเนื่องจาก

ทองแดงแบบเฉียบพลันแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1) การเกิดพิษจากระบบทางเดินอาหาร

การเกิดพิษเนื่องจากทองแดงจากระบบทางเดินอาหาร เกิดจากรับประทานอาหารที่มีทองแดงปะปนอยู่ปริมาณสูงเข้าไป การเกิดพิษลักษณะนี้ทำให้เกิดอาการคลื่นไส้อาเจียน และท้องร่วง นอกจากนี้ยังเกิดอาการเม็ดเลือดแดงถูกทำลาย เกิดอาการตับวาย มีเลือดออกในทางเดินอาหาร ปัสสาวะน้อยกว่าปกติ ไม่มีไนโตรเจนในเลือด (azotemia) ปัสสาวะมีโลหิต (hematuria) และโปรตีน (proteinuria) ความดันโลหิตสูง หัวใจเต้นเร็ว กล้ามเนื้อมีอาการหดเกร็งอย่างรุนแรง มีอาการโคม่า และตายในที่สุด ถ้าได้รับทองแดงมากเกินไป (อภิชาติ, 2536)

2) การเกิดพิษจากระบบทางเดินหายใจ

การเกิดพิษเนื่องจากทองแดงในลักษณะนี้เกิดจากการที่ร่างกายได้รับสารประกอบทองแดงหรือไอทองแดงโดยการหายใจเข้าไป ซึ่งทำให้เกิดการระคายเคือง และอักเสบในระบบทางเดินหายใจ ถ้าร่างกายได้รับไอทองแดงเป็นปริมาณมากจะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้อาเจียนเป็นไข้ (metal fume fever) และบางครั้งทำให้ผมและผิวหนังเปลี่ยนสีได้ การหายใจเอาฝุ่นและสารประกอบทองแดง (dusts and mists of copper salts) ปริมาณมากพอสมควรเข้าร่างกายสามารถทำให้เกิดอาการเลือดคั่งในเยื่อจมูกและช่องติดต่อระหว่างจมูกและปาก (pharynx) บางครั้งทำให้เกิดแผลทะลุใน septum ของจมูก นอกจากนี้สารประกอบทองแดง เมื่อเข้าตาจะทำให้เกิดอาการระคายเคือง ตาอักเสบ และตาขุ่นมัวได้ (สิทธิชัย, 2528)

2.3 ดิน (Soils)

ดิน คือ เทหวัตถุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติรวมกันขึ้นเป็นชั้น (profile) จากส่วนผสมของแร่ธาตุต่างๆ ที่สลายตัวเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยกับอินทรียวัตถุที่เปื่อยผุพัง อยู่รวมกันเป็นชั้นบางๆ ห่อหุ้มผิวโลก และเมื่อมีอากาศและน้ำเป็นปริมาณที่เหมาะสมแล้วจะช่วยค้ำจุนพร้อมทั้งช่วยในการยังชีพและการเจริญเติบโตของพืช (ปฐพีเบื้องต้น, 2548)

2.3.1 เนื้อดิน

คำว่า เนื้อดิน หมายถึง ความหยาบ ความละเอียดของดิน ในส่วนของเนื้อดินนั้นเราพิจารณาเฉพาะส่วนที่เป็นอนินทรียสารเท่านั้น ซึ่งมีประมาณไม่เกิน 96 เปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบที่เป็นของแข็ง ส่วนที่ควบคุมเนื้อดินก็คือสัดส่วนระหว่างอนุภาค ทราย (sand) ดินทรายแป้ง (silt) และ ดินเหนียว (clay) นิยมพิจารณาอนุภาคอนินทรียสารที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 2 มิลลิเมตร เนื้อดินไม่มีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช เนื้อดินมีผลทางอ้อมเนื่องจากเป็นตัวควบคุมสมบัติอื่นๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น การดูดน้ำ การดูดซับไอออน และการแลกเปลี่ยนก๊าซเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 อนุภาคของดิน

อนุภาคของดิน คือ ชิ้นส่วนของหินและแร่ ที่สลายตัวหรือผุกร่อนเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย ทั้งทางด้านกายภาพและทางด้านเคมี พวกที่ขนาดเล็ก โดยวัดเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลย์ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร เรียกว่า ดินผง (fine earth) อนุภาคของดินแบ่งเป็นกลุ่มได้ดังนี้

1. กลุ่มขนาดทราย (sand separate)
2. กลุ่มขนาดทรายแป้ง (silt separate)
3. กลุ่มขนาดดินเหนียว (clay separate)

เกณฑ์ในการจัดกลุ่มขนาดของอนุภาคดินที่นิยมแพร่หลายมีอยู่ด้วยกัน 2 ระบบ คือ ระบบของสหรัฐอเมริกา และระบบสากล มีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 (ปฐพีเบื้องต้น, 2548)

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์ในการจัดกลุ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคดิน

อนุภาคดิน	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคดิน วัดเป็นมิลลิเมตร	
	ระบบสหรัฐอเมริกา	ระบบสากล
ดินทรายหยาบมาก (very coarse sand)	1.00 – 2.00	-
ดินทรายหยาบ (coarse sand)	0.50 – 1.00	0.20 – 2.00
ดินทราย (medium sand)	0.25 - 0.50	-
ดินทรายละเอียด (fine sand)	0.10 - 0.25	0.02 – 0.20
ดินทรายละเอียดมาก (very fine sand)	0.05 - 0.10	-
ดินทรายแป้ง (silt)	0.002- 0.05	0.002 - 0.02
ดินเหนียว (Clay)	เล็กกว่า 0.002	เล็กกว่า 0.002

2.3.2.1 สมบัติบางประการของกลุ่มขนาดต่าง ๆ ของอนุภาคดิน

ดินผงจะมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง เล็กและใหญ่แตกต่างกันออกไปตั้งแต่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าจนถึงต้องใช้กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนส่องดูจึงจะเห็นได้ จึงมีการแบ่งขนาดของอนุภาคดินออกเป็นกลุ่มขนาดต่างๆ ได้ 3 กลุ่มดังต่อไปนี้คือ

1. กลุ่มขนาดทราย (sand separate) สามารถมองเห็นด้วยตา อนุภาคไม่เกาะยึดกับอนุภาคอื่นๆ สากมือ ไม่เหนียว ปั้นเป็นรูปต่างๆ ไม่ได้ และไม่พองตัวหรือหดตัว ประกอบด้วยแร่ ควอตซ์ และเฟลด์สปาร์ เป็นส่วนใหญ่

2. กลุ่มขนาดทรายแป้ง (silt separate) สามารถมองเห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดามีลักษณะอ่อนนุ่นคล้ายแป้งผัดหน้า มีความเหนียวเล็กน้อย ยึดติดกับอนุภาคอื่นได้เล็กน้อย ปั้นเป็นรูป

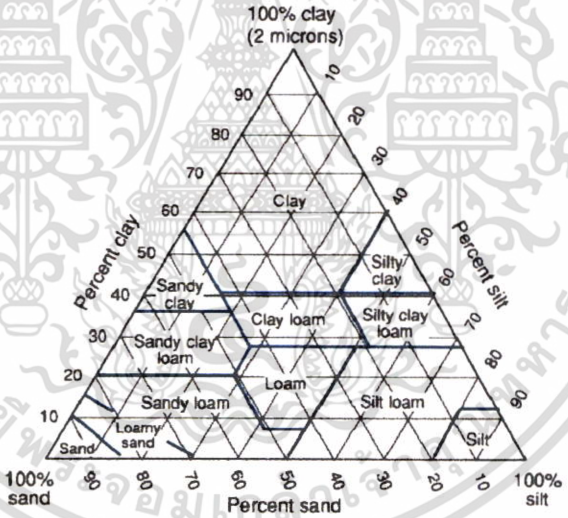
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆ ได้ซึ่งประกอบด้วยแร่ ควอตซ์ และ เฟลด์สปาร์ เป็นส่วนใหญ่ และมีแร่ดินเหนียวปริมาณเล็กน้อย

3. กลุ่มขนาดดินเหนียว (clay separate) สามารถมองเห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีลักษณะเหนียวเหนอะหนะสามารถปั้นรูปต่างๆ ได้ดีเมื่อชุ่ม แข็งเมื่อแห้ง พองตัวและหดตัวได้ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่

2.3.3 การจำแนกประเภทเนื้อดิน (Textural classification)

ดินทั่วไปจะประกอบด้วยอนุภาคทั้ง 3 กลุ่มขนาด คือ ทราย (sand), ทรายแป้ง (site), และดินเหนียว (clay) ดินแต่ละเขตที่มีความแตกต่างกันทางธรณีวิทยา ลักษณะภูมิประเทศ และภูมิอากาศจะมีสัดส่วนผสมของอนุภาคทั้ง 3 กลุ่มขนาดแตกต่างกัน เป็นผลให้เกิดเนื้อดินหลายชนิด และเนื่องจากสัดส่วนผสมของกลุ่มอนุภาคที่วิเคราะห์จริงจากตัวอย่างดินที่มีสมบัติคล้ายกัน อาจแตกต่างกันได้ นักวิทยาศาสตร์ทางดิน จึงจัดเนื้อดินเป็นกลุ่มประเภท ซึ่งมีด้วยกัน 12 ประเภท ดังแสดงในภาพ เนื้อดินที่ถูกจัดให้อยู่ประเภทเดียวกัน ถึงแม้จะมีความผันแปรของสัดส่วนผสมของอนุภาค 2 ชนิดได้แต่จะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่คล้ายกัน (ปฐพีเบื้องต้น, 2548)



รูปที่ 2.2 ไดอะแกรมสามเหลี่ยมแจงประเภทเนื้อดิน (ปฐพีเบื้องต้น, 2548)

2.3.4 ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange ccapacity หรือ CEC)

ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดินหรือคอลลอยด์นั้นหมายถึง "ปริมาณแคตไอออนทั้งหมดที่ดินหรือคอลลอยด์นั้นสามารถจะดูดยึดไว้ได้" การที่จะได้รู้ว่าคอลลอยด์หรือดินมี CEC เท่าใดนั้นจะต้องทำทำการวิเคราะห์ทางเคมีโดยการที่ไล่แคตไอออนเดิมที่ดูดซับอยู่ที่ผิวของดินเหนียวด้วย NH_4^+ หรือ Ba^{++} แล้วให้แคตไอออนเข้าไปแทนที่จนหมด จากนั้นก็ทำการวิเคราะห์หาปริมาณ adsorbed NH_4^+ หรือ Ba^{++} นั้นว่ามีอยู่เท่าใด โดยการบอกเป็นจำนวน milliequivalents ต่อดินเหนียว 100 กรัม ดังนั้นค่าของ CEC ของดินเหนียวหรือดินจึงบอกเป็นค่า meq/100 กรัมของดินหรือดินเหนียวนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า CEC ของดินจะมากหรือน้อยและจะแตกต่างไปจาก CEC ของดินอื่นๆนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของคอลลอยด์ดิน ปริมาณดินเหนียวที่มีอยู่ในดิน และปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

ในด้านเกี่ยวกับสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น ความร่วนซุย ความเหนียวของดินที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange reaction) เหมือนกัน เช่นดินมีโซเดียมแลกเปลี่ยนได้ มากๆ จะเหนียวน้ำจะซึมผ่านได้ยาก มักทำให้น้ำขังได้ง่าย การไถพรวนลำบาก เหนียวติดไถ แต่ถ้าเราไล่ Na ออกแล้วแทนที่ด้วย Ca^{++} แคตไอออนนี้จะทำให้ศักย์ซีตา (zeta potential) ของดินเหนียวลดลง และจับกลุ่มดินก็จะไม่เหนียวแต่จะร่วน ไถพรวนง่ายขึ้น การซึมผ่านของน้ำก็สะดวกขึ้นด้วย

ความเป็นกรดของดินเกิดขึ้นเนื่องจากมี H^+ ดูดซับอยู่ที่ผิวของดินเหนียวเป็นจำนวนมากกว่าแคตไอออนที่เป็นเบส เช่น Ca^{++} และ K^+ ดินที่เป็นกรดมากๆ จะไม่เหมาะแก่การปลูกพืช แต่สามารถปรับปรุงดินที่เป็นกรดให้เป็นกรดน้อยลงได้โดยการไล่ที่ H^+ ที่ดูดซับที่ผิวดินเหนียวนั้นให้หมดไปหรือลดน้อยลงด้วย การใส่ปูนลงไปในดิน Ca^{++} จากปูนจะเข้าไปแทนที่ H^+ ที่ผิวของดินเหนียว ส่วน H^+ ที่โดนไล่ออกมาก็จะทำปฏิกิริยากับ OH^- กลายเป็นน้ำ ความเป็นกรดของดินก็จะหมดไป

2.3.5 พีเอช (pH) ของดิน

สภาพกรดด่างของดินมีความสำคัญอย่างมากต่อการเจริญเติบโตของพืช ดินที่มีปฏิกิริยาเป็นกรดมากๆ พืชจะไม่เจริญเติบโตเท่าที่ควร การศึกษาอิทธิพลของสภาพกรดด่างในดินกับการเจริญเติบโตของพืชนั้นได้กระทำกันอย่างกว้างขวางจนเป็นที่ทราบกันทั่วไปแล้วว่า สภาพกรดด่างของดินหรือสารละลายธาตุอาหารนั้นมิได้มีอิทธิพลโดยตรงกับการเจริญเติบโตของพืช นักวิจัยบางท่านได้ทดลองปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับ pH 1 ถึง 12 ปรากฏว่าพืชเจริญเติบโตได้ดีพอๆ กันตั้งแต่ pH 3-10 ดังนั้นจึงสรุปว่าอิทธิพลของดินที่เป็นกรดซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชมิใช่เนื่องมาจากความเข้มข้นของ H^+ ในสารละลายดินโดยตรง แต่เมื่อดินเป็นกรดหรือด่าง สมบัติทางเคมีของดินจะถูกเปลี่ยนไปในทางที่ไม่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชมากกว่าดังนั้นความเป็นกรดของดินจึงมีอิทธิพลในการควบคุมการเจริญเติบโตของพืชในทางอ้อมมากกว่าทางตรง

ความเป็นกรดของดิน ในบางกรณีอาจใช้ในเทอมของปฏิกิริยาดิน (Soil reaction) ซึ่งบ่งชี้ถึงความเข้มข้นของ H^+ ที่ดูดซับบนอนุภาคของคอลลอยด์ที่ถือได้ว่าเป็นตัวเสริมความเป็นกรดได้ และสามารถรักษาสภาพการเปลี่ยนแปลง pH ได้ (Buffer capacity) เมื่อมีกรดหรือเบสความสามารถนี้จะมีความสัมพันธ์กับความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ถ้ามีค่า CEC สูง จะมี Buffer capacity สูงด้วย การเกิดสภาพดินเปรี้ยวเนื่องมาจากเกิดกรด-อนุมูลซัลเฟตในดิน

การปรับปรุงดินกรดคือ การปรับ pH ของดินให้สูงขึ้นจนมีสภาพใกล้เป็นกลาง โดยใช้ปูนขาวในอัตราที่เหมาะสม โดยปูนจะเพิ่มแคลเซียม และลดปริมาณอะลูมินัมที่เป็นพิษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 ความเค็มของดิน

ดินเค็มมีลักษณะทั่วไปเหมือนดินธรรมดา เพียงแต่มีเกลือที่ละลายง่ายอยู่สูงกว่าปกติเท่านั้น การวัดค่าการนำไฟฟ้าจะช่วยให้ทราบว่าเป็นดินเค็มหรือไม่

ดินที่จัดว่าเป็นดินเค็ม โดยมาตรฐานทั่วไปมักถือว่าค่า EC > 4 dS m^{-1} อย่างไรก็ตามพืชบางชนิดมีความไวต่อเกลือ (salt-sensitive plants) การเจริญเติบโตของพืชจะถูกกระทบกระเทือนเมื่อค่า EC > 2 dS m^{-1} ซึ่งเป็นเหตุผลหนึ่งที่ Terminology Committee (1973) ได้เสนอขีดขั้นจำกัดของดินที่ถือเอาค่า EC > 2 dS m^{-1} ถึงกระนั้นก็ตามเมื่อมองในมุมตรงข้าม มีพืชอีกมากชนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งพืชที่ชอบหรือทนความเค็ม เช่น พวกแฮโลไฟต์ (halophyte) สามารถเจริญเติบโตได้ดีเมื่อ EC > 4 dS m^{-1}

2.3.7 อินทรียวัตถุในดิน

อินทรียวัตถุในดินเป็นองค์ประกอบสำคัญในดินที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติต่างๆของดินทั้งทางเคมี ฟิสิกส์ และชีวภาพ อันส่งผลกระทบต่อเนื่องไปถึงระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน ความสามารถในการให้ผลผลิตของดิน รวมทั้งการพัฒนาระบบนิเวศ (ecosystem) ของแต่ละสภาพแวดล้อมโดยตรง

อินทรียวัตถุในดิน (soil organic matter) หรือเรียกอีกอย่างว่าฮิวมัส (humus) นั้น มีความหมายครอบคลุมตั้งแต่ส่วนของซากพืชหรือสัตว์ที่กำลังขยายตัวเซลล์จุลินทรีย์ทั้งที่ยังมีชีวิตอยู่และส่วนที่ตายแล้ว ตลอดจนสารอินทรีย์มีได้จากการย่อยสลาย หรือส่วนที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาใหม่ แต่ไม่รวมถึงรากพืชหรือเศษซากพืชหรือสัตว์ที่ยังไม่ย่อยสลาย โดยจากการวิเคราะห์สารประกอบส่วนที่เป็นคาร์บอนพบว่าโดยทั่วไปอินทรียวัตถุในดินจะประกอบด้วย 1) สารประกอบคาร์โบไฮเดรท ประมาณ10-20% 2) สารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบเช่นกรดอะมิโนและน้ำตาลอะมิโน (amino sugar) ประมาณ 20% 3) สารประกอบ aliphatic fatty acid, alkane ฯลฯ ประมาณ 10-20% 4) ส่วนที่เหลือก็เป็นสารประกอบพวก aromatic compound

ในการใช้ที่ดินเพื่อการเกษตรนั้น อินทรียวัตถุในดินนับเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะมีผลต่อระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน ตลอดจนคุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และทางชีวภาพของดินอันจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยตรง ระดับอินทรียวัตถุในดินจึงเป็นสมบัติประการหนึ่งของดินที่บ่งชี้ให้เห็นคุณภาพของที่ดินทางการเกษตร ปริมาณอินทรียวัตถุในดินแต่ละแห่งนั้นก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง ยกตัวอย่าง เช่น ดินในเขตทุ่งหญ้ามักจะมีระดับอินทรียวัตถุในดินสูงกว่าดินในเขตป่าไม้ เพราะมีปริมาณเศษซากพืชคลุกเคล้าในปริมาณมากกว่า ดินที่ใช้ในการเพาะปลูกมาเป็นเวลานานจะมีระดับอินทรียวัตถุอยู่ในระดับต่ำ เพราะการปฏิบัติงานทางการเกษตรหลายอย่างไปมีผลในการลดปริมาณเศษซากพืชที่ลงไปสู่ดิน หรือเร่งอัตราการสลายตัวของอินทรียวัตถุในดินเป็นต้น ดังนั้นระดับปริมาณอินทรียวัตถุในแต่ละพื้นที่จึงถูกกำหนดด้วยปัจจัยต่างๆ หลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดและปริมาณของพืชที่ปกคลุมพื้นที่ สภาพภูมิอากาศ สมบัติของดิน และระบบการเกษตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.8 น้ำในดิน

น้ำเป็นองค์ประกอบของดินโดยธรรมชาติ ดังนั้นในมวลดินจะมีน้ำอยู่เสมอไม่มากก็น้อย ดินที่ไม่มีน้ำเลยคือดินอบแห้ง (oven-dried soil) ซึ่งผ่านการอบที่ 102-110 °C จนมีมวลคงที่

หน้าตัดดินในสนามเปรียบเสมือนภาชนะบรรจุน้ำซึ่งมีน้ำไหลเข้าและไหลออกอยู่เสมอ ฝนซึ่งตกในบริเวณนั้น การชลประทาน การไหลบ่าจากบริเวณอื่น และการควบแน่นบนผิวดินจะเติมน้ำให้แก่หน้าตัดดินเป็นระยะๆ น้ำที่ไหลเข้าไปนี้มิได้หยุดนิ่งอยู่ในดินแต่อย่างใด แต่จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางต่างๆ ออกจากดินอยู่เสมอ เช่น ไอน้ำระเหยจากดินออกสู่บรรยากาศ ซึ่งอาจเป็นการระเหยจากดินโดยตรง (evaporation) หรือการระเหยผ่านต้นพืช ซึ่งเรียกว่าการคายน้ำ (transpiration) ในสภาวะน้ำเหลว น้ำในหน้าตัดดินอาจเคลื่อนที่ลึกลงไปในดินล่างซึ่งแห้งกว่า (percolation) หรืออาจซึมลึกเลยลงไปถึงชั้นน้ำใต้ดิน (drainage) ซึ่งจะไหลสู่น้ำธรรมชาติในที่สุด อีกด้านหนึ่งน้ำเหลวในดินอาจไหลไปผ่านดินไปยังบริเวณรอบรากพืชที่แห้งกว่า และพืชดูดไปใช้ที่สุดจะถูกคายออกสู่บรรยากาศในสภานะไอน้ำ

พืชที่ใช้น้ำจากดินได้สะดวกต่อเมื่อน้ำในดินไหลเข้าสู่รากพืชได้ในอัตราทัดเทียมกับอัตราการคายน้ำ ความเร็วการไหลของน้ำผ่านดินขึ้นกับแรงขับเคลื่อนน้ำ (driving force) และสภาพนำน้ำ (hydraulic conductivity) ของดิน โดยทั่วไปในดินที่ชื้นน้ำจะไหลไปสู่รากพืชได้เร็วกว่าในดินแห้ง พืชต้นหนึ่งๆจะใช้น้ำจำนวนมากในการเติบโตประมาณกันว่าพืชจะใช้น้ำประมาณร้อยกิโลกรัมต่อผลผลิตน้ำหนักแห้งเพียง 1 กิโลกรัม อย่างไรก็ดีอัตราเติบโตของพืชผันแปรโดยตรงกับปริมาณน้ำที่พืชดูดใช้ในช่วงเวลานั้น หากพืชดูดน้ำจากดินและคายน้ำมาก พืชจะเติบโตได้ดี หากในดินขาดแคลนน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืช พืชจะใช้น้ำได้น้อยจึงเกิดสภาวะขาดน้ำพืช และเป็นสาเหตุให้การเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืชลดลง

2.3.9 ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช

2.3.9.1 ธาตุอาหารหลัก

1. ไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของพืชประมาณร้อยละ 18 และปริมาณไนโตรเจนกว่าร้อยละ 80-85 ของไนโตรเจนทั้งหมดที่พบในพืชจะเป็นองค์ประกอบของโปรตีน ร้อยละ 10 เป็นองค์ประกอบของกรดนิวคลีอิก และร้อยละ 5 เป็นองค์ประกอบของกรดอะมิโนที่ละลายได้ โดยทั่วไป ธาตุไนโตรเจนในดินมักขาดมากกว่าธาตุอื่น โดยพืชนำไนโตรเจนที่มาใช้ผ่านการดูดซึมจากรากในดินในรูปของเกลือไนเตรท (NO_3^-) และเกลือแอมโมเนียม (NH_4^+)

ธาตุไนโตรเจนในดินมักสูญเสียได้ง่ายจากการชะล้างในรูปของเกลือไนเตรท หรือเกิดการระเหยของแอมโมเนีย ดังนั้น หากต้องการให้ไนโตรเจนในดินที่เพียงพอจึงต้องใส่ธาตุไนโตรเจนลงไปในดินในรูปของปุ๋ย นอกจากนี้ พืชยังได้รับไนโตรเจนจากการสลายตัวของอินทรียวัตถุ และการแปรสภาพของสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในดิน รวมถึงการได้รับจากพืชบางชนิด เช่น พืชตระกูลถั่ว ที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไรโซเบียมช่วยตรึงไนโตรเจนจากอากาศ ความต้องการธาตุไนโตรเจนของพืชขึ้นกับหลายปัจจัย อาทิ ชนิดของพืช อายุของพืช และฤดูกาล

อาการขาดธาตุไนโตรเจน

เมื่อพืชขาดไนโตรเจน การเจริญเติบโตจะชะงัก ใบมีสีเหลืองหรือเหลืองปนส้ม เนื่องจากขาดคลอโรฟิลล์ หากเป็นมากใบจะมีสีน้ำตาล โดยจะเริ่มที่ใบแก่ส่วนล่างก่อน ส่วนใบอ่อนในระยะแรกจะยังมีธาตุไนโตรเจนให้ใช้อยู่จากได้รับจากใบแก่ที่อยู่ด้านล่าง หากไนโตรเจนมีอยู่น้อยมาก ใบด้านล่างจะเหลือง หลุดร่วง และลุกลามไปยังใบอ่อนที่อยู่ด้านบน ทำให้ใบอ่อนมีสีเขียวซีด และเหลือง การเจริญเติบโตของยอดหยุดชะงัก ลำต้นผอมสูง ลำต้นแคระแกร็น ใบ กิ่งก้านลีบเล็ก และมีจำนวนน้อย การแตกกิ่งก้าน และการแตกกอของธัญพืชมีน้อย ในพืชบางชนิด รากของพืชยืดยาวผิดปกติ และมีการแตกแขนงเพียงเล็กน้อย พืชมีการสะสมแป้งหรือน้ำตาลมากกว่าปกติ การสร้างเซลลูโลสมากขึ้น ทำให้เนื้อเยื่อพืชแข็งกระด้าง มีความเหนียว ไม่น่ารับประทาน

2. ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสในดินมักมีปริมาณที่ไม่เพียงพอกับความต้องการของพืชเช่นกัน เนื่องจากเป็นธาตุที่ถูกตรึงหรือเปลี่ยนเป็นสารประกอบได้ง่าย สารเหล่านี้มักละลายน้ำได้ยาก ทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสต่อพืชลดลง ฟอสฟอรัสที่พบในพืชจะในรูปของฟอสเฟตไอออนที่พบมากในท่อลำเลียงน้ำ เมล็ด ผล และในเซลล์พืช โดยทำหน้าสำคัญเกี่ยวกับการถ่ายทอดพลังงาน เป็นวัตถุดิบในกระบวนการสร้างสารต่างๆ และควบคุมระดับความเป็นกรด-ด่าง ของกระบวนการลำเลียงน้ำในเซลล์

การนำฟอสฟอรัสจากดินมาใช้ พืชจะดูดฟอสฟอรัสในรูปอนุมูลไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน (H_2PO^{4-}) และไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน (HPO_4^{2-}) ปริมาณสารทั้งสองชนิดจะมากหรือน้อยขึ้นกับค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน ดินที่มีสภาพความเป็นกรด ฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน ($H_2PO_4^-$) หากดินมีสภาพเป็นด่าง ฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน (HPO_4^{2-}) แต่สารเหล่านี้ในดินมักถูกยึดด้วยอนุภาคดินเหนียว ทำให้พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ รวมถึงรวมตัวกับธาตุอื่นในดิน ทำให้พืชไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น ในสภาพดินที่เป็นเบส และเป็นกรดจัดที่มีแร่ธาตุ และสารประกอบอื่นมากฟอสเฟตจะรวมตัวกับไอออนประจุบวก และลบของธาตุ และสารประกอบเหล่านั้น กลายเป็นเกลือที่ไม่ละลายน้ำทำให้พืชนำไปใช้ได้น้อย ดังนั้น ในสภาพดินที่เป็นกลาง พืชจะนำฟอสเฟตไอออนมาใช้ประโยชน์ได้ดีกว่า โดยทั่วไปพืชจะต้องการฟอสฟอรัสประมาณ 0.3-0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง เพื่อให้การเจริญเติบโตทางใบเป็นปกติ แต่หากได้รับในปริมาณสูงกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งจะเกิดความเป็นพิษต่อพืช

อาการขาดธาตุฟอสฟอรัส

พืชที่ขาดธาตุฟอสฟอรัสจะมีอัตราการหายใจลดลง พืชสะสมคาร์โบไฮเดรตมากขึ้น ใบพืชมีสีเขียวเข้ม มีการสะสมรงควัตถุแอนโทไซยานินที่ลำต้น และก้านใบ ทำให้ก้านใบมีสีชมพู อาการจะเริ่มที่ใบแก่ก่อน ใบมีขนาดเล็ก จำนวนใบน้อย ใบแห้งเป็นจุดๆ การเจริญเติบโตของพืชหยุดชะงัก ลำต้นแคระแกร็น รากเปลี่ยนเป็นสีเหลืองหรือน้ำตาล การขาดธาตุฟอสฟอรัสยังมีผลต่อการออกดอกช้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนดอก ผล และเมล็ดน้อยลง ผลผลิตต่ำจากใบพืชที่เสื่อม และร่วงหล่นเร็วกว่าปกติ แต่หากได้รับฟอสฟอรัสมากพืชจะแก่เร็ว การขาดฟอสฟอรัสเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้รากพืชขยายยาว แม้ลำต้นเหนือดินหยุดการเจริญเติบโตแล้ว เพราะมีการกระจายคาร์โบไฮเดรตลงมาสู่รากพืชมากขึ้น เนื่องจากพืชมีความพยายามที่จะรักษาสภาพของราก เพื่อทำหน้าที่ดูดหาอาหารที่ขาดแคลนมาเพิ่มเติม

3. โพแทสเซียม

โดยทั่วไป โพแทสเซียมกระจายอยู่ดินชั้นบน และดินชั้นล่างในปริมาณที่ไม่แตกต่างกัน โพแทสเซียมเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับพืชเหมือนกับธาตุฟอสฟอรัส และธาตุไนโตรเจน พืชจะดูดโพแทสเซียมจากดินในรูปโพแทสเซียมไอออน โพแทสเซียมเป็นธาตุที่ละลายน้ำได้ดี และพบมากในดินทั่วไป แต่ส่วนใหญ่จะรวมตัวกับธาตุอื่นหรือถูกยึดในชั้นดินเหนียว ทำให้พืชนำไปใช้ไม่ได้ การเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมในดินจะเกิดจากการสลายตัวของหินเป็นดินหรือปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ในดินที่พืชสามารถนำไปใช้ได้

โพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของพืช พบมากในส่วนยอดของต้น ปลายราก ตาข้าง ใบอ่อน ในใจกลางลำต้น และในท่อลำเลียงอาหาร โดยทั่วไป ความต้องการโพแทสเซียมของพืชอยู่ในช่วง 2-5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง บทบาทสำคัญของโพแทสเซียม คือ ช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ ช่วยในกระบวนการสร้างแป้ง ช่วยในกระบวนการสังเคราะห์แสง ควบคุมศักย์ออสโมซีส ช่วยในการลำเลียงสารอาหาร ช่วยรักษาสมดุลระหว่างกรด และเบส

อาการขาดธาตุโพแทสเซียม

พืชที่ขาดโพแทสเซียม จะทาให้โพแทสเซียมที่สะสมในใบแก่ และเซลล์อื่นๆ เคลื่อนไปเลี้ยงเนื้อเยื่อที่กำลังเจริญ ทำให้ส่วนดังกล่าวมีอาการผิดปกติ เช่น ใบเหลืองเป็นแนว ซึ่งมักเกิดขึ้นในใบแก่ก่อน และใบแห้งตายเป็นจุดๆ โดยเฉพาะบริเวณขอบ และปลายใบ ใบม้วนงอ ลำต้นมีปล้องสั้น ยอดใบเป็นจุดๆ นอกจากนี้ พบว่า พืชที่ได้รับโพแทสเซียมไม่เพียงพอ จะทำให้กระบวนการสังเคราะห์แสงลดลง การควบคุมการปิด-เปิดปากใบผิดปกติ ปากใบเปิดเล็กน้อย ทำให้มีผลต่อกระบวนการสร้างและเคลื่อนย้ายน้ำตาลลดลง มีผลต่อคุณภาพของสี ขนาด น้ำหนัก ความหวาน และคุณภาพของผลหรือเมล็ด

2.3.9.2 ธาตุอาหารรอง 3 ธาตุ

1. ธาตุแคลเซียม (Ca) เป็นธาตุที่ต้นพืชนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตในตัวพืช ช่วยส่งเสริมการนำธาตุไนโตรเจนจากดินมาใช้ให้เป็นประโยชน์มากขึ้น ในระยะออกดอกและระยะที่สร้างเมล็ดพืชจะมีความจำเป็นมาก เพราะธาตุแคลเซียมจะมีส่วนในการเคลื่อนย้ายและเก็บรักษาคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนในพืช เพื่อนำไปใช้ในการสร้างผลและเมล็ดต่อไป

อาการของพืชที่ขาดแคลเซียมจะพบมากในบริเวณยอด และปลายราก ยอดอ่อนจะแห้งตาย และใบจะมีการการม้วนงอไปข้างหน้าและขาดเป็นริ้วๆ ซึ่งจะเกิดที่ใบอ่อนก่อน แก้ไขโดยการใส่ปูนขาว หินปูนบด หินปูนเผา เพื่อปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของดิน หรือการใส่ปุ๋ยคอกบำรุงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ธาตุแมกนีเซียม (Mg) เป็นองค์ประกอบของส่วนที่เป็นสีเขียว ทั้งที่ใบและส่วนอื่นๆ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสร้างอาหารและโปรตีนพืช

อาการขาดแมกนีเซียมจะสังเกตได้จากใบพืช ที่เหลืองซีดบริเวณเส้นกลางใบที่อยู่ใกล้กับผล ถ้าหากอาการขาดรุนแรงใบแก่จะมีอาการมากกว่าใบอ่อน

การขาดธาตุแมกนีเซียม จะทำให้ผลผลิตลดน้อยลงและต้นพืชทรุดโทรมอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสาเหตุที่พืชขาดธาตุแมกนีเซียมนั้น เพราะปริมาณแมกนีเซียมที่อยู่ในดินถูกชะล้างลึกลงไปเกินกว่าที่รากพืชจะดึงดูดมาใช้ได้ และการที่มีปริมาณโปแตสเซียมสะสมในดินมากเกินไปก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่สำคัญ

การแก้ไข สามารถทำได้โดยการปรับปรุงสภาพดิน ความเป็นกรด ด่างของดินให้เหมาะสมต่อการดูดเข้าไปใช้ของพืช และมีการใช้ปุ๋ยโปแตสเซียมที่พอเหมาะ ที่สำคัญก็คือ การฉีดพ่นทางใบด้วยธาตุอาหารเสริม ซึ่งมีธาตุแมกนีเซียมในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที

3. ธาตุกำมะถัน (S) กำมะถันมีความจำเป็นต่อการสร้างโปรตีนพืช เป็นองค์ประกอบของวิตามินบางตัวที่มีผลทางอ้อมต่อการสร้างสีเขียวของพืช ซึ่งจะช่วยให้เกิดการหายใจและการปรุงอาหารพืช

พืชที่ขาดกำมะถันจะมีเสียเขียวอ่อน หรือเหลืองคล้ายๆ อาการขาดไนโตรเจน ใบขนาดเล็กลง ยอดของพืชจะชะงักการเจริญเติบโต ลำต้นและกิ่งก้านลีบเล็ก อาการขาดธาตุกำมะถันจะมีอาการแตกต่างจากขาดธาตุไนโตรเจน คือจะปรากฏที่ยอดอ่อนก่อน ส่วนใบล่างยังคงปกติ ถ้าอาการรุนแรงใบล่างก็จะมีอาการด้วยเช่นกัน ซึ่งจะตรงข้ามกับอาการของการขาดไนโตรเจน จะแสดงอาการที่ใบล่างก่อน

ดินที่มักพบเสมอว่าขาดธาตุกำมะถันคือ ดินทราย ซึ่งมีอินทรียวัตถุน้อย การเพิ่มกำมะถันในดิน นอกจากจะมีการใส่กำมะถันผงโดยตรงแล้ว การใส่ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก หรือปุ๋ยพืชสด ก็เป็นวิธีการแก้ปัญหาการขาดธาตุกำมะถันในดินได้เช่นกัน แต่ข้อควรระวังในการใส่กำมะถันก็คืน หากใส่มากเกินความจำเป็นจะทำให้ดินเป็นกรดได้

2.3.9.3 ธาตุอาหารเสริม หรือจุลธาตุ 7 ธาตุ

1. ธาตุโบรอน (B) มีบทบาทเกี่ยวข้องต่อการดูดดึงธาตุอาหารพืช ช่วยให้พืชดูดเอาธาตุแคลเซียมและไนโตรเจนไปใช้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้พืชใช้ธาตุโปแตสเซียม ได้มากขึ้น มีบทบาทในการสังเคราะห์แสง การย่อยโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และเพิ่มคุณภาพทั้งรสชาติ ขนาด และน้ำหนักของผล เพิ่มความสามารถในการเจริญเติบโต เพราะโบรอนจะควบคุมการดูดและคายน้ำของพืชในขบวนการปรุงอาหารอีกทางหนึ่ง

หากขาดธาตุโบรอน ส่วนที่จะแสดงอาการเริ่มแรกคืนยอดและใบอ่อน ส่วนที่ยอดและตายยอดจะบิดงอ ใบอ่อนบางและโปร่งใสผิดปกติ เส้นกลางใบหนาก้าน และตกกระ มีสารเหนียว ๆ ออกมาตามเปลือกของลำต้น กิ่งก้านจะแลดูเหี่ยว ผลเล็กและแข็งผิดปกติ มีเปลือกหน้า บางทีผลแตกเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผลได้ อาการขาดธาตุนี้จะเห็นเด่นชัดเมื่อต้นพืชกระทบแล้งหรือขาดน้ำมาก ๆ ควรทำการปรับปรุงดินอย่าให้เป็นกรด-ด่างมาก และควรฉีดพ่นอาหารเสริมทางใบที่มีองค์ประกอบของโบรอนด้วย

2. ธาตุสังกะสี (Zn) สังกะสีมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับฮอร์โมนพืช กล่าวคือ พืชที่ขาดธาตุสังกะสีจะให้ปริมาณฮอร์โมน IAA ในตายอดลดลง ทำให้ตายอดและข้อปล้องไม่ขยาย ใบออกมาซ้อน ๆ กัน นอกจากนี้ยังมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับน้ำย่อยของพืชหลายชนิดในการสร้างอาหารและสังเคราะห์แสง จึงมีผลทางอ้อมในการสร้างส่วนสีเขียวของพืช

การแก้ไขที่และให้ผลแน่นอนคือการฉีดพ่นทางใบ ด้วยธาตุอาหารเสริมที่มีธาตุสังกะสีเป็นองค์ประกอบ

3. ธาตุเหล็ก (Fe) ธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบของโปรตีน และมีบทบาทสำคัญในการปรุงอาหารของพืช ช่วยกระตุ้นให้การหายใจและการปรุงอาหารของพืชเป็นไปอย่างสมบูรณ์

อาการขาดธาตุเหล็กจะแสดงออกทั้งทางใบและทางผล อาการเริ่มแรกจะสังเกตพบว่าใบอ่อนบริเวณเส้นใบยังคงมีคามเขียว แต่พื้นใบจะเริ่มเหลืองซีด ส่วนใบแก่ยังคงมีอาการปกติ ระยะต่อมาจะเหลืองซีดทั้งใบ ขนาดใบจะเล็กลงกว่าปกติและจะร่วงไปก่อนใบแก่เต็มที่ กิ่งแห้งตาย ส่วนอาการที่เกิดขึ้นกับผลผลิตคือผลผลิตจะลดลง ขนาดของผลเล็กและผิวไม่สวย ผิวเรียบและเกรียม การขาดธาตุเหล็กยังมีผลต่อการเจริญของยอดอ่อนด้วย

การแก้ไข ตามปกติช่วงความเป็นกรด-ด่างของดินที่พืชสามารถนำธาตุเหล็กไปใช้ได้คือค่า pH ระหว่าง 5.5-5.6 แต่ถ้าค่า pH ต่ำกว่านี้ จะทำให้ปริมาณของธาตุเหล็กมีมากเกินไปจนก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชได้ ธาตุเหล็กจะไปตรึงธาตุฟอสฟอรัสไว้จนพืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ การแก้ไขด้วยการฉีดพ่นธาตุอาหารเสริมทางใบ เป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาการขาดธาตุเหล็กได้

4. ธาตุทองแดง (Cu) หน้าที่ของธาตุทองแดง มีผลต่อพืชโดยอ้อม ในการสร้างส่วนที่เป็นสีเขียวของพืช ช่วยเพิ่มโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ และป้องกันการถูกทำลายส่วนสีเขียว นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบของน้ำย่อยในพืช ซึ่งมีผลต่อการปรุงอาหารยังผลต่อการเจริญเติบโตและการติดดอกออกผล

ธาตุทองแดงยังช่วยให้ต้นพืชสามารถดูดเอาธาตุเหล็กที่อยู่ในดินนำมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น อาการของพืชที่ขาดธาตุทองแดงใบพืชจะมีสีเขียวจัดผิดปกติ แล้วต่อมาจะค่อย ๆ เหลืองลง ๆ โดยแสดงอาการจะยอดลงมาถึงโคน อาการขาดธาตุทองแดงพบมากในเขตดินเปรี้ยว การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตอาจช่วยได้ หรือฉีดพ่นด้วยธาตุอาหารเสริม (ที่มีทองแดงประกอบ) ทางใบ

5. ธาตุแมงกานีส (Mn) ธาตุนี้มีผลกระทบต่อใบ เนื่องจากมีบทบาทในการสังเคราะห์แสงเป็นตัวกระตุ้นการทำงานของน้ำย่อยในต้นพืช และยังควบคุมกิจกรรมของธาตุเหล็กและไนโตรเจนในต้นพืชอีกด้วย

พืชที่ขาดธาตุแมงกานีสใบจะออกสีเหลือง ๆ ส่วนเส้นใบจะเขียวอยู่ปกติ โดยเฉพาะใบอ่อนอาจเกิดเป็นจุดขาว ๆ หรือจุดเหลืองที่ใบ ต้นโตช้า ใบไม่สมบูรณ์ พุ่มต้นโปร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พืชที่แสดงอาการขาดธาตุแมงกานีส ต้องฉีดพ่นเข้าทางใบด้วยธาตุอาหารเสริมที่มีองค์ประกอบของธาตุแมงกานีส

6. ธาตุโมลิบดินัม (Mo) บทบาทและหน้าที่ของธาตุโมลิบดินัมในพืชนั้น ทำให้การทำงานของธาตุไนโตรเจนในพืชสมบูรณ์ขึ้น นอกจากนี้ ยังจำเป็นสำหรับขบวนการสร้างสารสีเขียวและน้ำย่อยภายในพืชบางชนิดด้วย

พืชที่ขาดธาตุนี้ ที่ใบแจะเป็นจุดด่างเป็นด้วย ๆ ในขณะที่เส้นใบยังเขียวอยู่ ถ้าขาดธาตุนี้รุนแรง ใบจะม้วยเข้าข้างใน ลักษณะที่ปลายและขอบใบจะแห้ง ดอกร่วง และผลแคระแกรนไม่เติบโตเต็มที่

7. ธาตุคลอรีน (Cl) คลอรีนมีความสำคัญต่อขบวนการสังเคราะห์แสง มีผลทำให้พืชแก่เร็วขึ้น พืชที่ขาดธาตุคลอรีนใบจะซีด เหี่ยว และใบสีเหลืองบรอนซ์ ถ้ามีคลอรีนมากจำทำให้ของใบแห้ง ใบจะเหลืองก่อนกำหนด

2.3.10 ลักษณะดินจังหวัดฉะเชิงเทรา (กรมพัฒนาที่ดิน, 2556)

กลุ่มชุดดินที่ 18 ลักษณะโดยทั่วไป: เนื้อดินบนเป็นดินร่วนปนทราย สีเทาปนน้ำตาลอ่อน สีน้ำตาลปนแดงอ่อน ดินล่างเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย สีเทาปนน้ำตาล สีเทาปนชมพู พบจุดประสีน้ำตาลแก่ สีแดงปนเหลืองปะปน เกิดจากพวกตะกอนลำน้ำพบบริเวณ พื้นที่ราบเรียบหรือค่อนข้างราบเรียบตามลานตะพักลำน้ำระดับต่ำ น้ำแช่ขังลึก 30 ซม. นานประมาณ 4 เดือน เป็นดินลึก มีการระบายน้ำค่อนข้างเลว มีความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติค่อนข้างต่ำ ดินชั้นบน pH 6.0-7.0 ส่วนดินชั้นล่าง pH ประมาณ 5.5-6.5 ได้แก่ชุดดินเขาย้อย ชลบุรี และโคกสำโรง ปัจจุบันบริเวณดังกล่าวส่วนใหญ่ใช้ทำนา บางแห่งใช้ปลูกอ้อย ถั่วเหลือง ถั่วลิสง หรือปลูกพืชล้มลุกในฤดูแล้ง

ปัญหาในการใช้ประโยชน์ที่ดิน : เนื้อดินเป็นดินทรายหยาบ พืชมีโอกาสเสี่ยงต่อการขาดแคลนน้ำ ความอุดมสมบูรณ์ค่อนข้างต่ำ ฤดูฝนมีน้ำแช่ขังนาน 4 เดือน

ความเหมาะสมสำหรับการปลูกพืช : กลุ่มชุดดินที่ 18 พบบริเวณที่ราบต่ำ สภาพพื้นที่ราบเรียบถึงเกือบราบเรียบ ดินมีการระบายน้ำค่อนข้างเลวถึงเลว ในช่วงฤดูฝนมีน้ำขังนานระหว่าง 3-4 เดือน จึงมีศักยภาพเหมาะสมในการทำนามากกว่าการปลูกพืชไร่ พืชผักและไม้ผล ยกเว้นถ้าได้มีการปรับปรุงแก้ไขปัญหาน้ำขังและการระบายน้ำของดิน อย่างไรก็ตามในสภาพปัจจุบันสามารถปลูกพืชไร่และพืชผักอายุสั้นได้ ในช่วงฤดูแล้ง ถ้ามีน้ำชลประทานและแหล่งน้ำธรรมชาติเสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ถั่วเหลือง

2.4.1 ความสำคัญของถั่วเหลือง

ถั่วเหลือง เป็นพืชตระกูลถั่วที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของโลกและของประเทศไทย เมล็ดถั่วเหลืองประกอบด้วยโปรตีน (30-50 %) น้ำมัน (13-24 %) และยังมีคาร์โบไฮเดรท (12-24%) ดังนั้นถั่วเหลืองจึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย อาทิเช่น ใช้เป็นอาหารของมนุษย์ทั้งในรูปของการบริโภคโดยตรงหรือแปรรูปเป็นอาหารต่าง ๆ หรือใช้ในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันและอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่น ๆ ส่วนกากถั่วเหลืองยังใช้เป็นแหล่งโปรตีนสำหรับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ นอกจากนี้แล้วการปลูกถั่วเหลืองยังช่วยบำรุงดินอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากมีไรโซเบียมอาศัยอยู่ในปมที่ราก ทำให้สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ ถั่วเหลืองมีแหล่งกำเนิดในเขตอบอุ่น แต่ปัจจุบันมีการปลูกถั่วเหลืองกันแพร่หลาย ทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น สำหรับประเทศไทยนั้นมีการปลูกถั่วเหลืองกันมาช้านานแล้ว เริ่มปลูกกันในภาคเหนือ ต่อมาขยายไปยังภาคอื่น ๆ ยกเว้นภาคใต้ ปัจจุบันมีพื้นที่การปลูกถั่วเหลืองทั้งในฤดูฝนและฤดูแล้งรวมกันประมาณ 1.46 ล้านไร่ ได้ผลผลิตถั่วเหลืองประมาณ 3.2 แสนตัน แต่ก็ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ในประเทศ และมีการนำเข้าประมาณปีละ 1.5 ล้านตัน ทั้งในรูปของเมล็ด และกากถั่วเหลือง ถั่วเหลืองจัดได้ว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยพืชหนึ่งซึ่งนอกจากจะเป็นพืชอาหารของมนุษย์และสัตว์โดยตรงแล้ว ยังมีส่วนสำคัญในอุตสาหกรรมต่อเนื่องอีกมากมาย เช่น ไก่สดแช่แข็ง ทำสี สบู่ เครื่องสำอาง หมึกพิมพ์ ตลอดจนยารักษาโรคอื่นๆ และปัจจุบันนี้เกษตรกรก็ได้หันมาปลูกถั่วเหลืองกันมากขึ้น จากตัวเลขในปี 2523/2534 มีพื้นที่ปลูกถั่วเหลือง 7.88 แสนไร่ เพิ่มขึ้นในปี 2533/2534 เป็น 2.18 ล้านไร่ แต่อย่างไรก็ตาม ผลผลิตที่ได้รับก็ยังไม่เพียงพอกับความต้องการใช้ภายในประเทศ ถั่วเหลืองเป็นพืชน้ำมันที่สำคัญของโลกเนื่องจากสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งการบริโภคเมล็ดและน้ำมัน แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร และใช้กากเป็นอาหารสัตว์ ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น สีทาบ้าน ปลาทูน่ากระป๋อง พลาสติก และกาว เป็นเหตุให้ความต้องการใช้ถั่วเหลือง ขยายตัวมาโดยตลอด การผลิตในประเทศยังไม่เพียงพอ นอกจากนี้ยังใช้ประโยชน์เป็นพืชบำรุงดิน

2.4.2 พฤกษศาสตร์ถั่วเหลือง

1. อนุกรมวิธานของถั่วเหลือง

ถั่วเหลืองจัดอยู่ใน family Leguminosae, sub - family Papalionoideae และ tribe phaseoleae มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Glycine max (L.) Merrill*

2. เมล็ดถั่วเหลืองและการงอก

เมล็ดถั่วเหลืองเกิดขึ้นในฝัก ซึ่งฝักหนึ่งจะมีเมล็ดไม่เกิน 3 เมล็ด เมล็ดถั่วเหลืองมีลักษณะกลมรี คล้ายไต และหนักประมาณ 120-180 มิลลิกรัมต่อเมล็ด เมล็ดถั่วเหลืองส่วนใหญ่มีสีเหลืองฟางมองจากภายนอกเมล็ด จะเห็นรอยแผลเป็น เรียกว่า ตา หรือขั้วเมล็ด หรือ hilum ซึ่งเป็นจุดที่เมล็ดติดกับฝัก และมีรูเล็ก ๆ ที่เป็นจุดที่เชื้อตัวผู้เข้าผสมกับไข่ เรียกว่า micropyle ถัดไปจะเป็นรอยนูนของ hypocotyl - radicle axis ปลายอีกด้านหนึ่งของ hilum จะเป็นร่องเล็ก ๆ เรียกกันว่า raphe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะขนานยาวไปถึง chalaza ซึ่งเป็นจุดที่ integument ติดกับ ovule เมล็ดถั่วเหลืองประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ เปลือกเมล็ด (seed coat) ต้นอ่อน (embryo) และเนื้อเยื่อที่สะสมอาหาร (Storage tissue หรือ supporting tissue) เปลือกเมล็ดนั้นเป็นส่วนนอกสุด ทำหน้าที่โอบอุ้มและห่อหุ้มส่วนประกอบภายใน ให้คงรูปเป็นเมล็ด เปลือกเมล็ดถั่วเหลืองนั้น เจริญมาจากส่วนของ integument ซึ่งเป็นเนื้อเยื่อห่อหุ้ม ovule นอกจากเปลือกเมล็ดจะทำหน้าที่ห่อหุ้มเมล็ดส่วนที่อยู่ภายในไว้แล้ว ยังทำหน้าที่ป้องกันอันตรายให้กับส่วนที่อยู่ภายใน เช่น ใบเลี้ยง และต้นอ่อน มิให้ถูกทำลายโดยเชื้อรา และเชื้อแบคทีเรีย หากเปลือกเมล็ดชำรุดหรือถูกทำลาย โอกาสของการงอกของเมล็ดก็จะเป็นไปโดยยากลำบากส่วนที่สองที่มีความสำคัญอย่างยิ่งของเมล็ดถั่วเหลือง ได้แก่ ต้นอ่อน (embryo) หรือ(embryonic axis) ต้นอ่อนของถั่วเหลืองประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ epicoty, hypocotyl และ radicle radicle นั้นเป็นส่วนที่เจริญเติบโตเป็นราก hypocotyl จะยืดออกเมื่อเมล็ดงอก ทำหน้าที่ชูใบเลี้ยงขึ้นเหนือผิวดิน สำหรับ epicotyl จะกลายเป็นส่วนแรกของลำต้น และประกอบได้ด้วยจุดเจริญ (growing point) ซึ่งจะเติบโตเป็นต้นถั่วเหลืองอีกทีหนึ่ง (รูปที่ 3.1) ส่วนต่าง ๆ ของต้นอ่อนที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมดนี้ อยู่ภายใต้เปลือกเมล็ดในตำแหน่งใต้ hilum ส่วนที่สามที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของถั่วเหลือง ได้แก่ เนื้อเยื่อที่สะสมอาหาร (storagetissue หรือ supporting tissue) เนื้อเยื่อดังกล่าวได้แก่ใบเลี้ยง (cotyledon) ซึ่งทำหน้าที่เก็บและจ่ายอาหารตลอดจนผลิตเอ็นไซม์ต่าง ๆ ให้แก่ต้นอ่อน

รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของเมล็ดถั่วเหลือง (กรมวิชาการเกษตร, 2547)

2.4.4 พันธุ์ถั่วเหลือง

เชียงใหม่ 60 ทนทานต่อโรคราสนิมได้ดีกว่า สจ.4 และ สจ.5 เป็นพันธุ์ที่มีกิ่งน้อย แต่ในจำนวนฝักมาก สามารถเพิ่มจำนวนต่อไร่ได้อีกและผลผลิตจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย ตอบสนองต่อปุ๋ยอัตราต่ำได้ดีกว่า สจ.5 ปลูกได้ทั้งฤดูแล้งและฤดูฝน โดยให้ผลผลิตใกล้เคียงกับ สจ.4 และ สจ.5 อายุเก็บเกี่ยว 97 วัน

2.4.5 การปลูกการดูแลรักษาและการเก็บเกี่ยวถั่ว

การปลูกถั่วเหลือง

ถั่วเหลืองเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศพืชหนึ่งสามารถขึ้นได้ดีในสภาพดินฟ้าอากาศของประเทศไทย ทั้งฤดูฝนและฤดูแล้งเป็นพืชที่ให้โปรตีนสูง และราคาถูกเมื่อเทียบกับเนื้อสัตว์ แหล่งปลูกในประเทศไทย ได้แก่ ภาคเหนือ และภาคกลาง เช่น สุโขทัย เชียงใหม่ เพชรบูรณ์ พิจิตร พิษณุโลก แพร่ ลำปาง ตาก กำแพงเพชร ลพบุรี สระบุรี ชัยนาท สิงห์บุรี อ่างทอง กาญจนบุรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปราจีนบุรี ฉะเชิงเทรา ซึ่งเป็นแหล่งที่มีสภาพดินฟ้าอากาศเหมาะสมสามารถกระจายเนื้อที่ปลูกให้กว้างออกไปได้อีก ส่วนจังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้แก่ จังหวัดเลย นครราชสีมา ขอนแก่น อุดรธานี อุบลราชธานี มหาสารคาม หนองคาย ซึ่งเป็นแหล่งที่มีน้ำสำหรับปลูกถั่วเหลืองในฤดูแล้งได้หรือจะปลูกในฤดูฝน โดยใช้เป็นพืชหมุนเวียนกับพืชชนิดอื่น เช่น ปอ ข้าวโพด ข้างฟ่าง ฯลฯ สำหรับภาคใต้เนื่องจากมีฝนตกชุก การปลูกถั่วเหลืองเพื่อเก็บฝักแห้งอาจมีปัญหาในระหว่างการเก็บเกี่ยวและนวด แต่ถ้าปลูกเพื่อรับประทานฝักสดก็ได้ผลดี เนื่องจากถั่วเหลืองเป็นพืชที่ตลาดภายในประเทศมีความต้องการมากประกอบกับสามารถใช้เป็นพืชบำรุงดินได้ดี ฉะนั้นควรจะส่งเสริมการปลูกให้แพร่หลายมากยิ่งขึ้น โดยขยายเนื้อที่ปลูกใช้เมล็ดพันธุ์ดี มีการใช้เชื้อไรโซเบียมคลุกเมล็ดพันธุ์ก่อนปลูก รวมทั้งการปฏิบัติดูแลรักษาที่ดี จะเป็นการเพิ่มผลผลิตได้มาก

การเลือกพื้นที่ปลูก

ถั่วเหลืองขึ้นได้ในดินเกือบทุกชนิดที่มีการระบายน้ำได้ดี ตั้งแต่ดินร่วนปนทรายจนกระทั่งดินเหนียวที่มีความอุดม สมบูรณ์พอควรความเป็นกรดด่างของดินประมาณ 5.5 – 6.5 ไม่ชอบดินทรายจัด และสภาพดินที่เป็นเกลือหรือ กรดจัด ที่เหมาะสมคือดินร่วน, ดินร่วนเหนียว พื้นที่ที่เป็นดินกรด (ดินเปรี้ยว) ก่อนจะปลูกถั่วเหลืองควรใส่ปูนขาวตามค่าวิเคราะห์ดินเพื่อปรับระดับความเป็น กรด-ด่างของดินให้เหมาะสม ในฤดูฝนต้องทำการระบายน้ำ เพราะถั่วเหลืองไม่ชอบน้ำขังแฉะ ส่วนในฤดูแล้งต้องเลือกพื้นที่ที่มีน้ำเพียงพอตลอด ระยะเวลาการปลูกที่นาควรอยู่ในที่สูงพอควร และอยู่ในส่วนต้นหรือกลางคลอง สามารถส่งน้ำจากคลองชลประทาน เข้าไปในแปลงปลูกได้ ควรเรียงแปลงที่อยู่ในที่ลุ่มหรือปลายคลองหรือติดกับแปลงปลูกข้าวนาปรัง ทั้งนี้เพราะจะมี น้ำไหลซึมเข้าไปท่วมขัง ในแปลงถั่วเหลืองได้ในภายหลังควรรีบปลูกถั่วเหลืองให้เร็วที่สุดทันทีที่เก็บเกี่ยวข้าวเสร็จระหว่างรอให้ฟ่อนข้าวแห้งก่อนนวด ควรรีบปลูกถั่วทันที เพื่อที่จะเก็บเกี่ยวได้ก่อนที่ฝนต้นฤดูจะตก ทำให้ผลผลิตเสียหายลำบากต่อการเก็บเกี่ยวและนวด และเป็นการ เลี่ยงการเข้าทำลายของแมลงศัตรูและโรคได้มากการปลูกช้าจะทำให้ต้นถั่วออกดอกและติดฝักในช่วงปลายฤดูแล้ง ซึ่งน้ำชลประทานอาจขาดแคลนได้ ทำให้ได้ผลผลิตไม่สูงเท่าที่ควร

การปฏิบัติ ดูแลรักษา

1. การให้น้ำ ในฤดูแล้งควรให้น้ำประมาณ 5-6 ครั้งตลอดฤดูปลูกโดยให้ครั้งแรกก่อนปลูกครั้งต่อๆไปให้ทุก 10-14 วัน อีก 4-5 ครั้ง แล้วแต่ความชุ่มชื้นของดิน เนื่องจากความสามารถในการอุ้มน้ำของดินแตกต่างกันไป ควรจะสังเกตใบถั่วเหลืองประกอบด้วย เช่น โดยปกติใบถั่วจะเหี่ยวในตอนบ่าย และจะคืนตัวเป็นปกติในตอนเย็น หากเห็นว่าในตอนเย็นหรือตอนเช้า ใบถั่วยังมีอาการเหี่ยวไม่เป็นปกติ ก็ควรจะให้น้ำได้ การให้น้ำควรให้พอดี ไม่ควรให้น้ำท่วมแปลงถั่วเหลืองเกิน 1-2 วัน ถ้าให้มากเกินไปหรือดินชั้นล่างแฉะ จะสังเกตเห็นใบเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองก้านใบและเส้นใบจะเปลี่ยนเป็นสีม่วง ให้รีบระบายน้ำออกทันที และลดการให้น้ำครั้งต่อไปให้น้อยลง หรือยืดช่วงเวลาให้น้ำครั้งต่อไป นานกว่าเดิม ควรระวังอย่าให้ขาดน้ำในช่วงที่ออกดอกและติดฝัก หยุดให้น้ำเมื่อฝักเริ่มเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การพรวนดินและดายหญ้า ควรทำอย่างน้อย 2 ครั้ง ในระยะที่ต้นถั่วอายุไม่เกิน 30วัน หลังจากนี้แล้วถั่วจะเริ่มออกดอก การพรวนดินจะกระเทือนระบบรากและอาจทำให้ดอกร่วงได้ และในระยะที่ถั่วออกดอก ต้นถั่วจะแผ่กิ่งก้านมากพอที่จะปกคลุมดิน ป้องกันวัชพืชเจริญเติบโตได้ ปัญหาที่พบมากในการปลูกถั่วเหลืองฤดูแล้งในนาข้าวคือ วัชพืช โดยเฉพาะหญ้าและลูกข้าวจะงอกขึ้นมาเมื่อได้รับน้ำ จึงควรกำจัดพืชอย่างน้อย 2 ครั้ง ตามความจำเป็น หากอายุเกิน 30 วันแล้วไม่ควรทำอีกการดูแลแปลงปลูกถั่วเหลืองในระยะ 1 เดือนแรก ให้ปลอดจากวัชพืชรบกวนได้ นับว่าสำคัญที่สุดในการเพิ่มผลผลิต ถั่วเหลือง

3. การบำรุงดิน ในดินที่อุดมสมบูรณ์แล้ว เมื่อใส่ปุ๋ยไนโตรเจนลงไปอาจทำให้ถั่วเหลือง เฝือใบได้ และเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตโดยไม่จำเป็นแต่ในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำจะต้องใช้ปุ๋ยเคมีช่วย และควรให้ปุ๋ยถูกต้องกับความต้องการของถั่วเหลืองด้วย ในดินที่ได้ทำการเกษตรกรรมมานาน ปริมาณธาตุอาหารในดินย่อมลดน้อยลงโดยเฉพาะไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ส่วนโปแตสเซียมพื้นที่ส่วนใหญ่จะมีปริมาณเพียงพอ แต่ถ้าดินขาดธาตุโปแตสเซียมแล้วถั่วเหลืองจะมีอาการตอบสนองต่อปุ๋ยได้ง่าย โดยเฉพาะใน ดินทรายถึงร่วนปนทรายพบว่าในดินที่ขาดธาตุโปแตสเซียม ถ้ามีการให้ปุ๋ยโปแตสเซียมช่วยแล้ว จะให้ผลดียิ่งขึ้น ผลผลิตจะเพิ่มและเปอร์เซ็นต์น้ำมันในเมล็ดจะเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากความอุดมสมบูรณ์ของดินแล้ว ปฏิกิริยาความเป็นกรดหรือเป็นด่างของดินก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความเจริญเติบโตของถั่วเหลืองและประสิทธิภาพของการใช้ปุ๋ย ถั่วเหลืองจะมีการเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีความเป็นกรดและด่างของดินประมาณ 5.5-6.5 สำหรับดินปนทรายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนสูงหรือต่ำไม่ช่วยให้เพิ่มผลผลิตสูงได้ เนื่องจากการสูญเสียไนโตรเจนไปอย่างรวดเร็ว แต่การใช้เชื้อไรโซเบียมคลุกเมล็ดก่อนปลูกจะมีผลดีกว่าการ ใช้ปุ๋ยไนโตรเจน

การให้ปุ๋ย สูตรปุ๋ย ที่ใช้สำหรับถั่วเหลือง

1. การปลูกในดินนาหลังเก็บเกี่ยวข้าว

ดินร่วนปนทราย ใช้ปุ๋ยเคมี สูตร 12 – 24 – 12 อัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่

ดินเหนียวใช้ปุ๋ยเคมี สูตร 0-40-0 อัตรา 15 กิโลกรัมต่อไร่ หรือสูตร 0-40-0 อัตรา 13 กิโลกรัมต่อไร่

2. การปลูกในดินไร่

ใช้ปุ๋ยเคมี สูตร 12-24-12 อัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ หรือสูตรใกล้เคียง เช่น 6-24-24 หรือ 15-15-15 หรือ 16-20-0 อัตราเดียวกัน

วิธีการใส่ปุ๋ย ควรใส่ปุ๋ยทั้งหมดก่อนปลูกหรือพร้อมการปลูกโดยหยอดก้นหลุมหรือก้นร่องแถวปลูกกลบดินบางๆ แล้วจึงหยอดเมล็ด หรือใส่ปุ๋ยหลังปลูกโดยการเปิดร่องตื้นๆ แล้วโรยปุ๋ยตามแนวร่องห่างจากโคนต้นถั่วเหลืองประมาณ 10 เซนติเมตร (1 ฝ่ามือ) แล้วไถกลบ พร้อมกับการกำจัดวัชพืชครั้งแรก เมื่อถั่วเหลืองอายุ 15-20 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเก็บเกี่ยวและนวดถั่วเหลือง

ถั่วเหลืองจะสุกและเก็บเกี่ยวได้เมื่อมีอายุ 75-110 วัน (ขึ้นอยู่กับพันธุ์) เมื่อสุกฝักมีสีเหลืองแล้วเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ใบเป็นสีเหลืองหรือน้ำตาลและร่วงจากลำต้น การเก็บเกี่ยวอาจกระทำโดยตัดต้นให้ชิดดินแล้วรวบรวมเพื่อนำไปยังลานนวด ถ้านวดด้วยเครื่องจักรก็ควรที่ตัดต้นและนวดในแปลงปลูกเลย ทั้งนี้เพราะส่วนของลำต้นและฝักจะได้คืนกลับไปสู่ดินต่อไป การนวดถั่วเหลืองอาจนวดในลานนวดโดยใช้สัตว์เดินย่ำ หรือใช้รถแทรคเตอร์เล็กวิ่งทับก็ได้ ถ้าจำนวนน้อย ๆ ก็ใส่กระสอบป่านใช้ไม้ทุบแต่จะนวดออกดีเมื่อตากแห้งสนิทเท่านั้น ภายหลังการนวดก็ทำความสะอาดเมล็ดและเก็บบรรจุกระสอบ หรืออาจตากแดดต่อจนแห้งสนิท การเก็บเมล็ดเมื่อยังมีความชื้นจะทำให้เมล็ดขึ้นรา สูญเสียความงอกเร็ว

วัชพืชและการป้องกันกำจัด

วิธีการป้องกันและกำจัดวัชพืช

1. วิธีกล โดยกำจัดวัชพืชที่ขึ้นแล้ว การกำจัดจะมีประสิทธิภาพ ประหยัดเวลาและแรงงาน ควรกระทำเมื่อวัชพืชมีขนาดเล็กยังไม่ออกดอก เพื่อไม่ให้วัชพืชแพร่พันธุ์เพิ่มปริมาณ ซึ่งมีวิธีปฏิบัติดังนี้

1.1) การเผา ใช้เผาทำลายวัชพืชหรือตอซังในนาหลังเก็บเกี่ยวข้าวทั้งวิธีปลูกโดยมีการเตรียมดินหรือ ปลูกในตอซัง การเผาอาจทำลายวัชพืชที่มีอยู่ในไม่หมดหากวัชพืชไม่แห้ง หรือมีฟางที่ใช้เผาน้อย จึงปรากฏมีวัชพืชงอกขึ้นมาภายหลัง

1.2) การทำรุ่น หมายถึงการกำจัดวัชพืชโดยใช้เครื่องมือต่าง ๆ คือ

ก. จอบ ใช้จอบดายวัชพืชในระหว่างแถวและต้น

ข. คราดซี่ ใช้คราดซี่ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นเอง ลากเข้าไปในระหว่างแถว คราดให้วัชพืชหลุดจากดิน วิธีนี้ทำได้ดีในสภาพดินค่อนข้างแห้งร่วนและวัชพืชยังเล็ก

1.3) การเกี่ยว โดยใช้เคียวหรือแว้งตัดส่วนของวัชพืชที่อยู่เหนือดิน วิธีนี้ใช้กันมากในแหล่งปลูก

ที่มีฝนตกชุกจนเข้าไปดายหญ้าไม่ได้ หรือในสภาพการปลูกถั่วเหลืองที่ไม่มีการกำจัดวัชพืชมาตั้งแต่ระยะแรก จึงเกี่ยวกับวัชพืชไปเลี้ยงสัตว์

1.4) การใช้วัสดุคลุมดิน ใช้ฟางข้าว ตอซังพืช คลุมผิวดินบนแปลงให้หนาประมาณ 1-2 นิ้ว ในระยะหลังอาจมีวัชพืชใบกว้างขึ้นมาก็ต้องเก็บด้วยมือ

2. การใช้ระบบปลูกพืช โดยปลูกเป็นพืชแซม หรือพืชหมุนเวียนหรือพืชร่วมกับพืชอื่น

3. การใช้สารเคมีป้องกันกำจัดวัชพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yuebing *et al.* (2016) ทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของซีพิโอไลท์ เบนโทไนท์ และฟอสเฟต ในการตรึงหรือฟื้นฟูแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินโดยศึกษาลักษณะทางสรีรวิทยา ขั้นตอนการสกัดลำดับขั้น การเจริญเติบโตของพืชและความเข้มข้นของแคดเมียม โดยกิจกรรมเอนไซม์ในดิน และจำนวนจุลินทรีย์ ผลของการสกัดลำดับขั้นพบว่ารูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ของแคดเมียมในดิน ส่วนใหญ่ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ carbonate รูปฟอร์มที่ละลายน้ำของแคดเมียมในดินลดลงเมื่อทดลองใช้ซีพิโอไลท์ เบนโทไนท์ และฟอสเฟตเมื่อเทียบกับดินควบคุม สารปรับปรุงนำไปสู่การลดลงของแคดเมียมในราก ต้น ใบ ข้าวกล้อง และเมล็ดข้าว ชี้ให้เห็นว่าสารปรับปรุงดินทั้งหมดมีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมและทำให้แคดเมียมมีปริมาณต่ำที่จะเคลื่อนย้ายสู่พืช

Wu *et al.* (2016) ศึกษาสารปรับปรุงรวม 2 ชนิด คือ หินปูน+ซีพิโอไลท์ ในอัตราส่วน 1:2 เพื่อฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักตะกั่วและแคดเมียม ทำการทดลองเป็นเวลา 3 ปี ในดินปนเปื้อนใกล้เหมืองในประเทศจีน โดยใช้ หินปูน+ซีพิโอไลท์ ในอัตราส่วน 1:2 ความเข้มข้น 0, 2, 4 และ 8 g/kg ปลูกข้าวติดต่อกันนาน 3 ปี ระหว่างปี 2012-2014 ผลการทดลองพบว่า ค่า pH ในดินทั้ง 3 ปีมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจากในปีที่ 1>2>3 ผลจากการใช้หินปูน+ซีพิโอไลท์ทำให้รูปฟอร์มที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ลดลงในดินที่ปนเปื้อนตะกั่วและแคดเมียม โดยลดลงในปีที่ 1>2>3 ความเข้มข้นตะกั่วในข้าวลดลง พบว่า ปีที่ 1>3>2 ความเข้มข้นแคดเมียมในข้าวลดลง พบว่า ปีที่ 3>1>2 ในทั้ง 3 ปี ผลของหินปูน+ซีพิโอไลท์ ช่วยลดความเข้มข้นของแคดเมียมในข้าวกล้องดีกว่าตะกั่ว โดยมีการเคลื่อนย้ายโลหะจากฟางสู่แกลบในปริมาณสูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแกลบเป็นส่วนหลักในการสะสมโลหะหนัก ดังนั้นหินปูน+ซีพิโอไลท์ มีความเหมาะสมมากสำหรับการฟื้นฟูระยะยาวในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมมากกว่าตะกั่ว

Hang *et al.* (2014) ในงานวิจัยนี้ ได้ทดลองการทำโลหะหนักให้เสถียรในพื้นที่ โดยได้ใช้สารปรับปรุงรวมสองชนิด (LS, หินปูน + ซีพิโอไลต์ : HZ, ไฮดรอกซีอะพาไทต์ + ซีโอไลต์) ในอัตราส่วน 0.2%, 0.4% และ 0.8% (w/w) เติมลงในดินนาที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักต่างๆ (ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และ สังกะสี) และศึกษาผลของสารปรับปรุงรวมทั้งสองชนิดต่อโลหะหนักที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ในดิน และการดูดซึมและสะสมโลหะหนักในต้นข้าว การใช้ LS และ HZ ทำให้ค่าพีเอชของดินและปริมาณความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และส่งผลให้โลหะรูปแบบที่สามารถแลกเปลี่ยนได้และความเข้มข้นของโลหะของดินที่เติมสารปรับปรุงที่ผ่านกระบวนการ through toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) LS และ HZ สามารถยับยั้งการดูดซึมและสะสมของตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และ สังกะสี ในต้นข้าวได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับดินควบคุม เมื่อเติม LS เพิ่มขึ้นจาก 0.2% ถึง 0.8% ความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และ สังกะสี ในข้าวกล้องลดลง และเมื่อเติม HZ เพิ่มขึ้นจาก 0.2% ถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.8% ความเข้มข้นลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักในสารสกัด TCLP และในเนื้อเยื่อข้าวมีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่เป็นบวกอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นตะกั่ว การสกัดโลหะหนักด้วย TCLP เป็นวิธีที่เหมาะสมมากกว่าวิธีการใช้ส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ ในการประเมินโลหะหนักที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ในดินที่มีการใช้สารปรับปรุง เนื่องเป็นการประเมินโลหะหนักที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ในดิน จากผลทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า LS และ HZ มีผลต่อการลดลงของโลหะหนักที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ และการสะสมโลหะในต้นข้าวที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อน

Liang *et al.* (2014) ในงานวิจัยนี้ทดลองตรึงที่แหล่งกำเนิด ดำเนินการโดยปลูกข้าวในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมเพื่อตรวจสอบการฟื้นฟูที่ดีที่สุดที่จะช่วยลดการสะสมของแคดเมียมในข้าวกล้อง โดยใช้ซีพิโอไลท์และ polygorskite เป็นสารปรับปรุง ผลของการฟื้นฟูโดยใส่สารปรับปรุงในดินและข้าววิเคราะห์โดย X-ray diffraction และ X-ray photoelectron spectroscopy โดยใช้ซีพิโอไลท์และ polygorskite พบว่าค่าพีเอชของดินดินมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณต่างกัน และสกัดความเข้มข้นของแคดเมียมด้วย HCl, TCLP, $CaCl_2$, และ NH_4OAc พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมในข้าวกล้องลดลง ทั้งซีพิโอไลท์และpolygorskite ยังช่วยลดความเข้มข้นของแคดเมียมโดยลดรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ ช่วยเพิ่มรูปฟอร์มคาร์บอเนตและรูปฟอร์มที่เหลือตกค้างในดินนา อาจทำให้เกิดการตกตะกอนแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตหรือไฮดรอกไซด์ และเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิวซึ่งเป็นกลไกหลักในการตรึงโดยใช้ซีพิโอไลท์และ polygorskite ความเข้มข้นของแคดเมียมลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ซีพิโอไลท์สามารถลดความเข้มข้นแคดเมียมให้ต่ำกว่า 0.18 mg/kg ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานอาหาร Codex และมาตรฐานอาหารของจีน

Sun *et al.* (2013) ศึกษาผลของการฟื้นฟูโดยใช้ซีพิโอไลท์ในดินสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนแคดเมียม (Cd) โดยใช้ชุดของตัวแปร (ค่า pH ของดิน ปริมาณแคดเมียม ความเข้มข้นแคดเมียมในพืช กิจกรรมเอนไซม์ดินและจุลินทรีย์) ผลการศึกษาพบว่าค่า pH เพิ่มขึ้นหลังจากการใช้ซีพิโอไลท์ นอกจากนี้ซีพิโอไลท์ (0.5% -5%) สามารถยับยั้งการดูดซึมแคดเมียมอย่างมีนัยสำคัญในยอดผักขม ผลจาก 28.0% เป็น 63.7% จาก 29.4% เป็น 67.8% และจาก 17.2% มาอยู่ที่ 72.1 % ลดลงตามลำดับเมื่อเทียบกับดินที่ไม่ได้ใส่สารปรับปรุง โดยที่ 1.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของการปนเปื้อนแคดเมียม เมื่อเติมซีพิโอไลท์ 1 % ความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนที่กินได้ของผักโขม มีค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ (MPC) ต่ำกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักสด สำหรับค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ในผัก (MPC) พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมสูงขึ้น (2.5 และ 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ต้องเติมซีพิโอไลท์เพิ่มขึ้น 5% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของซีพิโอไลท์ในการลดปริมาณแคดเมียมที่จะเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร

Sun *et al.* (2012) ผลของการฟื้นฟูการตรึงของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้ซีพิโอไลท์แล้วประเมินจากค่าพีเอชในดิน กิจกรรมเอนไซม์ จำนวนจุลินทรีย์ ความเข้มข้นของแคดเมียมโดยใช้วิธี TCLP การเจริญเติบโตของผักขม การดูดซึมและสะสมของแคดเมียม ผลการศึกษาพบว่า ซีพิโอไลท์สามารถเพิ่มค่าพีเอชของดิน ในขณะที่ความเข้มข้นของแคดเมียมโดยใช้วิธี TCLP มีค่าลดลงเมื่อเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณซีพิโอไลท์ การเปลี่ยนแปลงของกิจกรรมเอนไซม์ในดินและจำนวนแบคทีเรียชี้ให้เห็นว่ามีการฟื้นตัวจากการเผาผลาญอาหารบางอย่างเกิดขึ้นหลังจากการใส่ซีพิโอไลท์ และผักขมมีชีวมวลเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวควบคุม เมื่อความเข้มข้นของซีพิโอไลท์มีค่า ≤10 g/kg อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของแคดเมียมในใบและรากผักขมจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราซีพิโอไลท์ โดยผลชี้ให้เห็นว่าซีพิโอไลท์มีศักยภาพในการลดความเข้มของแคดเมียมที่อาจปนเปื้อนสู่ห่วงโซ่อาหาร

Zang *et al.* (2012) ศึกษาการใช้ ซีโอไลต์ ไดอะตอมไมท์ ซีพิโอไลท์ เบนโทไนท์ ผสมกับหินปูนในอัตราส่วนต่าง 1:2, 2:1 และทดลองเดี่ยวๆ โดยเติมลงดินในปริมาณ 6 g/kg สำหรับดิน 50 g หลังจาก 2 สัปดาห์ ศึกษาการตรึงโลหะหนักในดินด้วยวิธีการสกัด TCLP ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าเมื่อผสมไดอะตอมไมท์และหินปูน ในอัตราส่วน 1:2 ให้ผลดีที่สุด และสามารถช่วยลดปริมาณ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ในดินได้ 54.3%, 100%, 27.2% และ 63.8% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่า ไดอะตอมไมท์ผสมกับหินปูนที่อัตราส่วน 1:2 มีผลในการตรึงโลหะหนักได้มีประสิทธิภาพโดยเฉพาะ ตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น 6405 ยี่ห้อ Jeyway
2. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชั่น สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) รุ่น Aanalyst 200 ยี่ห้อ Perkin Elmer
3. เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy) รุ่น SRS 3400 ยี่ห้อ Brukeraxs
4. เครื่องเขย่า (Orbital Skaker Gallenkamp) ยี่ห้อ Gallenkamp
5. เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) รุ่น 250 ยี่ห้อ Denver Instrument
6. ไฮโดรมิเตอร์มาตรฐาน ASTM No.1.152H อ่านสเกลในหน่วยกรัมต่อลิตร
7. เครื่องวัดการนำไฟฟ้า (Conductivity meter) รุ่น model 125 ยี่ห้อ Orin
8. เครื่องชั่งละเอียดแบบ 4 ตำแหน่ง (Digital balance) รุ่น TL-254 ยี่ห้อ Denver Instrument Company
9. ตู้อบแบบอากาศร้อน รุ่น FT 01/124 ยี่ห้อ Fisher Scientific Worldwide
10. เตานำความร้อน (hot plate)
11. ตะแกรงขนาด 2 มิลลิลิตร
12. กระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร
13. ครกบดดิน
14. ขวดพลาสติกใส่สารตัวอย่าง
15. เทอร์โมมิเตอร์
16. เดซิเคเตอร์
17. กระบอกเก็บตัวอย่างดิน (Core)
18. แท่งคนแบบ plunger

3.1.2 สารเคมี

1. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA
2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) Commercial Grade บริษัท Merck, USA
3. สารละลายโซเดียมอะซิเตต (NaOAc) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กรดแอซิติก (CH_3COOH) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

5. สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน pH 4 และ 7 AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

6. สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

7. สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมท ($K_2Cr_2O_7$) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

8. สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2.6H_2O$) AR Grade บริษัท Fluka, USA

9. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

10. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท (NH_4OAc) AR Grade บริษัท J.T.Baker, USA

11. สารละลายแอมโมเนียมออกซาเลท [$(NH_4)_2C_2O_4H_2O$] AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

12. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) AR Grade บริษัท Fisher Chemical, USA

13. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

14. ซิลเวอร์ไนเตรท ($AgNO_3$) AR Grade บริษัท Fisher Scientific, USA

15. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

16. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) AR Grade บริษัท Fisher Scientific, USA

17. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

18. กรดบอริก (H_3BO_3) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

19. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต ($C_8H_5O_4K$; KHP) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

20. ฟีนอลฟทาลีน (Phenolphthalein) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

21. โบรโมครีซอลกรีน (Bromocresol green) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

22. แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) AR Grade บริษัท BDH Chemicals, Germany

23. แอมโมเนียมโมลิบเดต [$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$] AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

24. แอนติโมนีโพแทสเซียมตาร์เตรท ($KSbO \cdot C_4H_4O_6$) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

25. โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) AR Grade บริษัท Carlo Erba, USA

26. แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) AR Grade บริษัท Loba Chemie, India

27. ซีพิโอไลท์ AR Grade บริษัท Sigm-Aldrich, Spain

28. แคดเมียมไนเตรต (Cd(NO3)2.4H2O) บริษัท Carlo Erba, USA

29. ซิงค์ไนเตรต (Zn(NO3)2.6H2O) บริษัท Carlo Erba, USA

30. คอปเปอร์ไนเตรต (Cu(NO3)2.3H2O) บริษัท Carlo Erba, USA

31. เลดไนเตรต (Pb(NO3)2) บริษัท Carlo Erba, USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ตัวอย่างดินและพืช

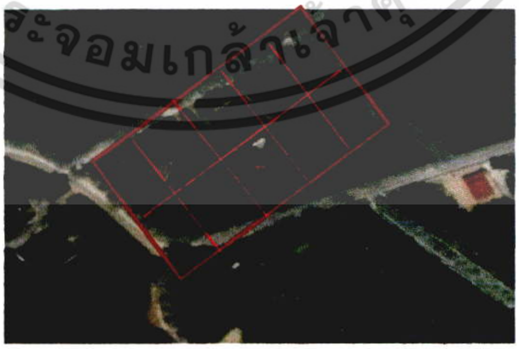
3.2.1 ดินที่ใช้เพาะกล้า

เป็นดินผสมตราละโว้ สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด ดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 ดินผสม ตราละโว้

3.2.2 ดินที่ใช้ปลูกพืช

ดินที่ใช้ในการทดลองเก็บมาจากพื้นที่ อำเภอแปลงยาว จังหวัดฉะเชิงเทรา ละติจูดที่ 13° 36' 17" ลองติจูดที่ 101° 14' 49" ทำการเก็บตัวอย่างวันที่ 17 กรกฎาคม 2558 (รูปที่ 3.2) โดยพื้นที่ 10 ไร่ จะทำการสุ่มตัวอย่างดินประมาณ 10 จุด ขุดหลุมเป็นรูป V ให้ลึกในแนวดิ่งประมาณ 15- 30 cm. จากปากหลุมถึงก้นหลุม ดินที่ได้นี้เป็นดิน จาก 1 จุด ทำเช่นเดียวกันนี้จนครบ นำดินทุกจุดใส่รวมกัน และนำดินที่เก็บได้รวบรวมใส่กระสอบ แล้วนำมาผสมรวมกันเป็นการเก็บตัวอย่างแบบผสมใช้เป็นตัวแทนของดินทั้งแปลง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

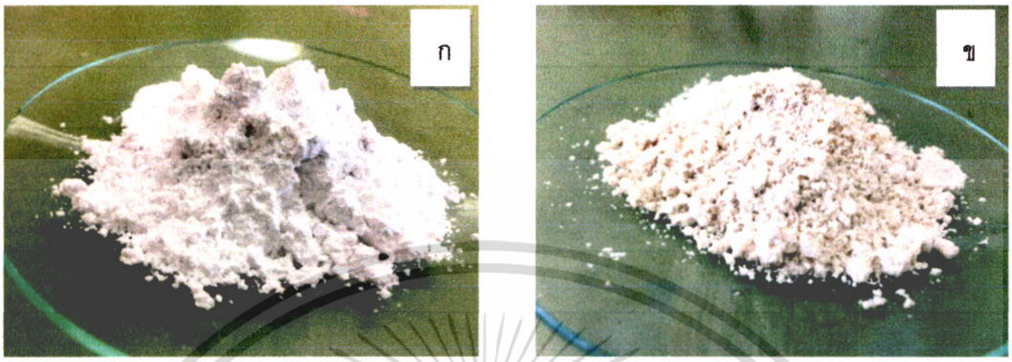


รูปที่ 3.2 แปลงที่ดินจังหวัดฉะเชิงเทรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 สารปรับปรุงดิน

หินปูน (รูปที่ 3.3 (ก)) และซีพิโอไลท์ (รูปที่ 3.3 (ข)) สามารถซื้อได้จากบริษัท Loba Chemie และ Sigma-Aldrich ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 (ก) หินปูน (ข) ซีพิโอไลท์

3.2.4 พืชทดลอง

ถั่วเหลืองที่ใช้ในการทดลองเลือกใช้พันธุ์เชียงใหม่ 60 เนื่องจากมีช่วงการเจริญเติบโตและอายุการเก็บเกี่ยวไม่นานมากประมาณ 97 วัน แหล่งที่มาจากแปลงทดลองคณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยพิจารณาความสมบูรณ์ของเมล็ดถั่วเหลืองที่มีเมล็ดใหญ่ ไม่บิดเบี้ยว และทำการเพาะกล้าลงในถาดเพาะหลุมละ 3 เมล็ด เมื่อกล้าอายุ 20 วัน เลือกต้นที่มีความสมบูรณ์ มีความสูงใกล้เคียงกัน ย้ายปลูกลงกระถางที่ใส่ดินผสมสารปรับปรุงดินไว้ตามอัตราส่วนที่กำหนด กระถางละ 1 ต้น

3.2.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์ดินปนเปื้อนโลหะ

1. เก็บตัวอย่างดินจากจังหวัดฉะเชิงเทราโดยการสุ่มให้ครบทุกจุดในพื้นที่ที่กำหนด แล้วนำมาผสมรวมกันจะได้ตัวแทนของดินทั้งแปลง

2. นำดินมาแยกเศษไม้ เศษใบไม้ และวัตถุที่ไม่ต้องการออกให้เหลือเฉพาะดิน แล้วทำการสับดินหรือย่อยดินให้มีขนาดที่เหมาะสม คลุกเคล้าให้เข้ากันอีกครั้ง จากนั้นนำไปผึ่งแดดให้แห้ง

3. นำดินที่ได้จากข้อ 2 มาจำนวน 210 กิโลกรัม แล้วทำการผสมโลหะให้มีความเข้มข้นดังนี้ แคดเมียม 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทองแดง 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สังกะสี 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตะกั่ว 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (อ้างอิงจากระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนโลหะหนักในดินของประเทศไทย) ผสมกับดินให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใส่น้ำจนท่วมทิ้งไว้กลางแจ้ง บ่มดินไว้ในกระบะเป็นเวลา 1 เดือน เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป โดยการนำไปใช้ต้องนำไปหาความชื้นก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การดำเนินการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างดินและการวิเคราะห์

นำตัวอย่างดิน มาตากจนแห้ง บดดิน และนำไปร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 2 มิลลิเมตร เก็บแยกในถุงพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไปดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินก่อนการปลูกถั่วเหลือง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
1. ค่าความเป็นกรดด่าง	pH meter
2. ค่าการนำไฟฟ้า	Conductivity meter
3. ขนาดของอนุภาค	Particle size analysis
4. ค่าความหนาแน่นรวมของดิน	Core method
5. ความชื้น	Gravimetric method
6. อินทรียวัตถุ	Walkley and Black method
7. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	Kieldahl method
8. ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์	Bray No.II method, UV-Spectrophotometer
9. ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์	Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
10. ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด	Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
11. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	Ammonium saturation method
12. โลหะในรูปแบบต่างๆ	Sequential extraction (Tessier et al. 1979)

หมายเหตุ: วิธีวิเคราะห์โดยละเอียดอยู่ในภาคผนวก ก.

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างพืชสำหรับการวิเคราะห์

นำผลผลิตส่วนเมล็ด ราก และลำต้นถั่วเหลืองที่ได้จากการปลูกแล้ว (ล้างดินออกจนหมด) มาอบที่อุณหภูมิ 70 °C จนแห้ง บดให้ละเอียด และนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เก็บแยกไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์หาโลหะหนักต่อไป โดยการย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้นและกรดไฮดรคลอริกเข้มข้น แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

3.3.3 ขั้นตอนการปลูกถั่วเหลือง และบันทึกผล

1) ผสมสารปรับปรุงดินกับดินที่ทำการสังเคราะห์โลหะแล้ว (ดินจังหวัดฉะเชิงเทรา) ตามอัตราส่วนต่างๆ กัน โดยผสมหินปูนต่อซีพิโอไลท์ที่อัตราส่วน 1:0 0:1 1:1 และ 2:1 ที่ปริมาณ 0.2%, 0.4%, 0.8% (w/w) ทิ้งไว้ประมาณ 30 วัน จากนั้นนำลงในกระถางพลาสติกขนาด 15×20 cm. ซึ่งจัดวางแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุ่มโดยสมบูรณ์ (Completely Randomized Design (CRD)) และเก็บตัวอย่างดินที่ผสมสารปรับปรุงดินแล้วนำไปวิเคราะห์ตามตารางที่ 3.1

2) นำต้นกล้าถั่วเหลือง แยกลงปลูกในกระถางพลาสติกที่เตรียมดินผสมสารปรับปรุงดิน รดน้ำอาทิตย์ละ 2-3 ครั้ง กำจัดวัชพืชโดยใช้มือถอน และหากพบแมลงศัตรูพืชต้องรีบกำจัดโดยการจับออกแล้วนำไปทำลาย ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 กระถางละ 1 กรัม เมื่อกล้าอายุได้ 1 เดือน และ 2 เดือน

3) บันทึกการเจริญเติบโตของต้นถั่วเหลือง โดยการวัดความสูง และจำนวนฝักทุกสัปดาห์ตั้งแต่เริ่มลงกล้า

4) เก็บเกี่ยวถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 เมื่ออายุครบ 110 วัน โดยนับตั้งแต่วันเพาะกล้า และทำการเก็บเกี่ยวฝักถั่วเหลืองโดยใช้กรรไกรตัดฝัก

5) หลังการเก็บเกี่ยว นำต้นถั่วเหลืองออกจากกระถาง ล้างดินออกให้สะอาด ทำการนับจำนวนฝักทั้งหมด

6) นำส่วน ลำต้น ราก ใบ และเมล็ด ไปอบที่อุณหภูมิ 70°C จนแห้ง และชั่งน้ำหนักเมล็ดแห้ง

7) นำส่วนราก ลำต้นรวมกับใบ และส่วนเมล็ด แห้งไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะโดย AAS

8) เก็บตัวอย่างดินหลังการเก็บเกี่ยวไปอบแห้งเพื่อนำไปวิเคราะห์ตามตารางที่ 3.1 ต่อไป

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลแบบ one-way ANOVA ทดสอบความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบภายในชุดทดลอง และระหว่างชุดทดลองของดินทั้งก่อนและหลังการปลูกถั่วเหลือง

3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก (Translocation factor, TF)

การศึกษาอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักในรากและเมล็ด สามารถบ่งชี้ได้ว่ามีการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากรากไปสู่เมล็ดถั่วเหลืองมากน้อยเพียงใด จากการนำข้อมูลความเข้มข้นของแคดเมียม (Cd) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ในเมล็ดและรากของถั่วเหลือง นำมาคำนวณค่าการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก (Translocation factor, TF) จากรากสู่เมล็ด โดยใช้สูตร (Sudapa and Bhattacharyya, 2008)

$$TF = (C_{seed}/C_{root})$$

C_{seed} = ความเข้มข้นของโลหะหนักในเมล็ด

C_{root} = ความเข้มข้นของโลหะหนักในราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 ปัจจัยการสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation factor, BAF)

ปัจจัยการสะสมทางชีวภาพ คือ อัตราส่วนของความเข้มข้นของโลหะในมวลพืชต่อความเข้มข้นของโลหะในดิน ซึ่งปัจจัยการสะสมทางชีวภาพจะบ่งชี้ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายโลหะจากดินไปยังพืช โดยใช้สูตร (Damodaran *et al.*, 2014)

$$BAF = C_{metal\ in\ dried\ biomass\ (mg/kg)} / C_{metal\ in\ the\ soil\ (mg/kg)}$$

$C_{metal\ in\ dried\ biomass}$ = ความเข้มข้นโลหะหนักในพืช

$C_{metal\ in\ the\ soil}$ = ความเข้มข้นของโลหะในดิน

3.4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

ทำการศึกษาต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ โดยทำการวิเคราะห์อัตราส่วนที่ช่วยลดปริมาณโลหะหนักในเมล็ดถั่วเหลืองให้ไม่เกินค่ามาตรฐานอาหารได้มากที่สุด แล้วนำมาคำนวณความคุ้มทุนต่ออัตราส่วนสารปรับปรุงดินที่ต้องใช้ต่อ 1 ไร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

4.1.1 สมบัติทั่วไป

จากตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินพบว่า ดินจังหวัดฉะเชิงเทรามีลักษณะเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย (ภาคผนวก ข-5) มีความชื้นประมาณ 11.74% มีค่าความเป็นกรดด่างคือ 6.5 ซึ่งจัดว่าเป็นกรดเล็กน้อย แต่เมื่อเติมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ มีผลทำให้ดินฉะเชิงเทรามีค่าความเป็นกรดด่างเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อการปลูกถั่วเหลืองอยู่ระหว่าง 6.8 - 8 (กรมวิชาการเกษตร, 2547) ดังนั้นการเติมสารปรับปรุงดินลงในดินในอัตราส่วนต่างๆ ยังทำให้ค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการปลูกถั่วเหลือง ความหนาแน่นของดินเป็นตัวบ่งชี้อย่างหนึ่งของระดับการอัดตัวของอนุภาคของดิน ดินมีความหนาแน่น 1.54 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าการนำไฟฟ้า (EC) เท่ากับ 320 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร การนำไฟฟ้าของดิน (Electrical Conductivity, EC) คือ ความสามารถของดินในการส่งผ่านหรือนำกระแสไฟฟ้า ค่า EC มีความสัมพันธ์กับสมบัติดินที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น เนื้อดิน CEC ความเค็มของดิน (salinity หรือ salt concentration) โดยทั่วไปมักใช้ประเมินระดับความเค็มของดิน (ไม่ได้หมายถึงดินมีรสชาติเค็ม แต่หมายถึงความมากน้อยของปริมาณธาตุที่มีประจุในดิน) เมื่อเปรียบเทียบค่านำไฟฟ้าของดินทั้ง 3 ครั้ง พบว่ามีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ สำหรับค่าการนำไฟฟ้านี้เหมาะสมสำหรับปลูกพืชตระกูลถั่วซึ่งสามารถทนเค็มได้ปานกลาง (กรมวิชาการเกษตร, 2547)

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) มีค่าเท่ากับ 5.94 มิลลิสมมูลต่อดิน 100 กรัม ซึ่งมีค่าความอุดมสมบูรณ์ของดินค่อนข้างต่ำ (ปฐพีเบื้องต้น, 2548) ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) คือ 5.88 % ซึ่งจัดว่ามีอินทรียวัตถุอยู่ในระดับสูง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) ดินแต่ละชนิดก็มีความจุหรือความสามารถในการดูดซับ หรือแลกเปลี่ยนธาตุที่มีประจุบวกเหล่านี้แตกต่างกัน ดินที่มีอนุภาคดินเหนียวมากจะมี CEC สูงกว่าดินที่มีอนุภาคทรายมาก และดินที่มีอินทรียวัตถุสูงจะมี CEC สูง (กรมวิชาการเกษตร, 2558)

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) พบว่าไม่สามารถตรวจวัดได้ (n.d.) อาจเนื่องจากไนโตรเจนจากแหล่งต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน และมีการสูญหายไปจากดินโดยการใช้ของพืชและจุลินทรีย์โดยการชะล้าง (Leaching) และโดยการระเหยเป็นก๊าซ (Volatilization) (กรมวิชาการเกษตร, 2557) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (avail. P) และปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (avail. K) มีค่าเท่ากับ 10.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 29.54 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างต่ำ (ปฐพีเบื้องต้น,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2548) เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับข้อมูลชุดดินกลุ่มชุดดินที่ 18 ของกรมพัฒนาที่ดิน (ภาคผนวก ข) พบว่ามีความสอดคล้องกัน

จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด (ตารางที่ 4.1) พบว่ามีปริมาณแคดเมียม สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง เท่ากับ 4.03, 45.44, 27.71 และ 6.96 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนโลหะในดินที่ทำการเกษตรของประเทศไทย มีดังนี้คือปริมาณแคดเมียมในดินต้องไม่เกิน 0.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สังกะสีในดินต้องไม่เกินค่ามาตรฐาน 70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตะกั่วในดินต้องไม่เกินค่ามาตรฐาน 55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณทองแดงต้องไม่เกิน 45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งโลหะหนักทั้งหมดอยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ดังกล่าวข้างต้น ยกเว้นแคดเมียมที่มีปริมาณสูงกว่าเกณฑ์เล็กน้อย

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

คุณสมบัติของดิน		ผลการวิเคราะห์
ค่าความเป็นกรดด่าง		6.5 ± 0.06
ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ซม.)		320 ± 5.13
ชนิดของดิน		ดินร่วนเหนียวปนทราย
ค่าความหนาแน่นรวมของดิน (กรัม/ลบ.ซม.)		1.54 ± 0.05
ความชื้น (%)		11.74 ± 1.43 %
อินทรียวัตถุ (%)		5.88 ± 0.39 %
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (%)		n.d.
ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		10.94 ± 1.37
ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)		29.54 ± 2.64
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (มิลลิสมมูล/ดิน100 ก.)		5.94 ± 0.54
ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดิน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)	Pb	27.71 ± 0.71
	Cu	6.96 ± 0.92
	Cd	4.03 ± 0.35
	Zn	45.44 ± 2.42

4.1.2 สมบัติของสารปรับปรุงดิน

ผลการวิเคราะห์สมบัติของสารปรับปรุงดิน แสดงดังตารางที่ 4.2 จากตารางพบว่าปริมาณแคดเมียมและตะกั่วในหินปูนมีปริมาณค่อนข้างสูงซึ่งอาจส่งผลทำให้เพิ่มปริมาณโลหะหนักในดิน แต่ในการทดลองใส่ปริมาณเล็กน้อยซึ่งไม่มีผลต่อดินโดยรวมมากนัก ค่าความเป็นกรดด่างของหินปูนและซีพิโอไลท์แสดงคุณสมบัติเป็นด่าง โดยแคลเซียมคาร์บอเนตในหินปูนและซีพิโอไลท์เป็นสารที่เป็นเบส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างของดิน ค่าความเป็นกรดด่างของดินมีบทบาทสำคัญมากต่อความสามารถในการเคลื่อนที่โลหะหนักและที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (Zhou *et al.*, 2014)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณโลหะหนักและค่าความเป็นกรดด่างของสารปรับปรุงดิน

สารปรับปรุง	โลหะหนัก (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)				pH
	Cd	Pb	Zn	Cu	
หินปูน	6.09	26.15	3.39	1.29	9.44
ซีพิโอไลท์	1.39	8.52	9.16	3.49	8.72

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์สารปรับปรุงดิน ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)

สารปรับปรุง	ชนิดธาตุ	ปริมาณธาตุ
หินปูน	CaO	84.2%
	Nd_2O_3	7.98 %
	V_2O_5	3.69%
	CuO	2.216%
	MgO	1.96%
	MnO	1.18%
	SO_3	0.451%
	Fe_2O_3	0.298%
ซีพิโอไลท์	SiO_2	58.2%
	MgO	32.3%
	SO_3	0.379%
	CaO	0.387%
	Fe_2O_3	0.608%

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์สารปรับปรุงดิน ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) พบว่าหินปูนมีปริมาณ CaO มากที่สุดคือร้อยละ 84.2 ซีพิโอไลท์มีปริมาณ SiO_2 มากที่สุดร้อยละ 58.2 รองลงมาคือ MgO ร้อยละ 32.3 สามารถบ่งบอกได้ปริมาณองค์ประกอบของสารปรับปรุงดินแต่ละชนิด ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนของสารปรับปรุงดิน

สารปรับปรุงดิน	พื้นที่ผิว (Surface area) ตารางเมตร/กรัม	ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) มิลลิลิตร/กรัม	ขนาดรูพรุน (Pore size) นาโนเมตร
หินปูน	4.067	0.0242	2.38
ซีพิโอไลท์	169.2	0.5002	5.56

จากตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรและรูพรุนของอนุภาคหินปูนและซีพิโอไลท์ โดยใช้เทคนิคของ Brunauer Emmett Teller (BET) จะเห็นได้ว่าหินปูนมีพื้นที่ผิว ปริมาตรและรูพรุนน้อยกว่าซีพิโอไลท์ โดยพบว่าพื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ เมื่อพื้นที่ผิวมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้นตาม นอกจากนั้นยังมีปริมาตรและขนาดรูพรุนที่มีผลต่อการดูดซับ ซึ่งมีส่วนช่วยในการดูดซับเช่นเดียวกัน ดังนั้นซีพิโอไลท์อาจให้ผลที่ดีกว่าหินปูนในการดูดซับโลหะหนัก และเมื่อผสมหินปูนกับซีพิโอไลท์รวมกันน่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรึงโลหะในดินได้ดียิ่งขึ้น เนื่องด้วยคุณสมบัติที่แตกต่างกันของสารปรับปรุงดินทั้ง 2 ชนิด

4.1.3 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดด่างในดินหลังเติมสารปรับปรุงดิน

การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดด่างหลังจากการปรับปรุงด้วยหินปูน:ซีพิโอไลท์ ในอัตราส่วนต่างๆ คือ 1:0(D), 0:1(E), 1:1(F) และ 2:1(G) โดยเติมลงไปในปริมาณ 0.2% (X), 0.4% (Y) และ 0.8% (Z) เป็นระยะเวลา 1 เดือน ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 จากตารางจะเห็นว่าค่าความเป็นกรดด่างของดินเพิ่มขึ้น โดยยิ่งเติมสารปรับปรุงดินมากยิ่งทำให้ดินเป็นเบสมากเพราะสารปรับปรุงทั้ง 2 ชนิดมีคุณสมบัติเป็นเบส เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้เติมสารปรับปรุงดินพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งความเป็นกรดด่างของดินมีบทบาทสำคัญมากต่อโลหะหนักที่สามารถเคลื่อนที่และที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ และสามารถส่งผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนบวกที่พื้นผิวและสารละลาย การแลกเปลี่ยนไอออน และกระบวนการรวมตัวกับโลหะอื่นๆ (Jonos *et al.*, 2010) การเติมสารปรับปรุงที่เป็นเบสทำให้ค่าความเป็นกรดด่างของดินเพิ่มขึ้นสามารถลดความสามารถในการละลายและการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน เนื่องจากค่าความเป็นกรดด่างที่สูงจะเพิ่มประจุลบบนดิน และส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับโลหะประจุบวกมากขึ้น (Komarek *et al.*, 2013) ดังนั้นพืชจึงสามารถดูดโลหะหนักได้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าความเป็นกรดด่างในดินหลังเติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน:ซีพิโอไลท์) ในอัตราส่วนต่างๆ (Mean ± S.D.)

อัตราส่วน (หินปูน : ซีพิโอไลท์) (สัญลักษณ์)	ปริมาณที่เติมลงในดิน	สัญลักษณ์	ความเป็นกรดด่างในดิน
ชุดควบคุม (C)	0%	-	6.4 ± 0.10
(1:0) (D)	0.2 %	X	7.27 ± 0.02
	0.4 %	Y	7.38 ± 0.03
	0.8 %	Z	7.43 ± 0.03
(0:1) (E)	0.2 %	X	7.13 ± 0.12
	0.4 %	Y	7.20 ± 0.06
	0.8 %	Z	7.22 ± 0.03
(1:1) (F)	0.2 %	X	7.22 ± 0.01
	0.4 %	Y	7.29 ± 0.02
	0.8 %	Z	7.31 ± 0.04
(2:1) (G)	0.2 %	X	7.35 ± 0.01
	0.4 %	Y	7.43 ± 0.02
	0.8 %	Z	7.48 ± 0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลผลิตของถั่วเหลือง

น้ำหนักแห้งของเมล็ดถั่วเหลือง

ชนิดของโลหะหนักและสารปรับปรุงดินเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อน้ำหนักแห้งของเมล็ดถั่วเหลือง จากผลการทดลองในตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าเมื่อเติมสารปรับปรุงดินที่มีส่วนผสมของหินปูน:ซีพิโอไลท์ ในอัตราส่วน 1:1 ลงไปในดิน 0.2% ผลผลิตเมล็ดถั่วเหลืองที่ได้มีน้ำหนักแห้งมากที่สุด คือ มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ย เท่ากับ 21.31 กรัมต่อกระถาง เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้เติมสารปรับปรุงดิน พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งการเจริญเติบโตเกี่ยวข้องกับหลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็น สภาพแวดล้อม ธาตุอาหารที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ค่าความเป็นกรดด่าง สำหรับอัตราส่วนอื่นๆ อาจเกี่ยวข้องกับค่าความเป็นกรดด่างหรืออาจเป็นเพราะมีการดูดโลหะหนักมากกว่าอัตราส่วนอื่น จึงส่งผลต่อน้ำหนักของเมล็ดถั่วเหลือง ทำให้เมล็ดไม่เจริญเติบโตเท่าที่ควร พืชต่างชนิดกันเจริญเติบโตได้ดีในระดับค่าความเป็นกรดด่างที่แตกต่างกัน โดยพืชพวกตระกูลถั่วชอบดินที่เป็นกลางและด่างเล็กน้อย (ปฐพีเบื้องต้น, 2548)

ตารางที่ 4.6 น้ำหนักแห้งของเมล็ดถั่วเหลืองที่ปลูกในดินปนเปื้อนโลหะหนักและใส่สารปรับปรุงดินอัตราส่วนต่างๆ (Mean ± S.D.)

อัตราส่วน (หินปูน : ซีพิโอไลท์) (สัญลักษณ์)	ปริมาณที่เติมลงในดิน	สัญลักษณ์	น้ำหนักของเมล็ดถั่วเหลือง (กรัม/กระถาง)
ชุดควบคุม (C)	0%	-	6.39 ± 0.85
(1:0) (D)	0.2 %	X	7.91 ± 0.38
	0.4 %	Y	7.59 ± 1.20
	0.8 %	Z	8.47 ± 0.69
(0:1) (E)	0.2 %	X	7.25 ± 0.93
	0.4 %	Y	8.02 ± 0.24
	0.8 %	Z	14.58 ± 3.98
(1:1) (F)	0.2 %	X	21.31 ± 3.50
	0.4 %	Y	12.91 ± 2.13
	0.8 %	Z	17.06 ± 1.75
(2:1) (G)	0.2 %	X	8.41 ± 1.31
	0.4 %	Y	9.18 ± 2.05
	0.8 %	Z	13.65 ± 2.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การเจริญเติบโตของถั่วเหลือง

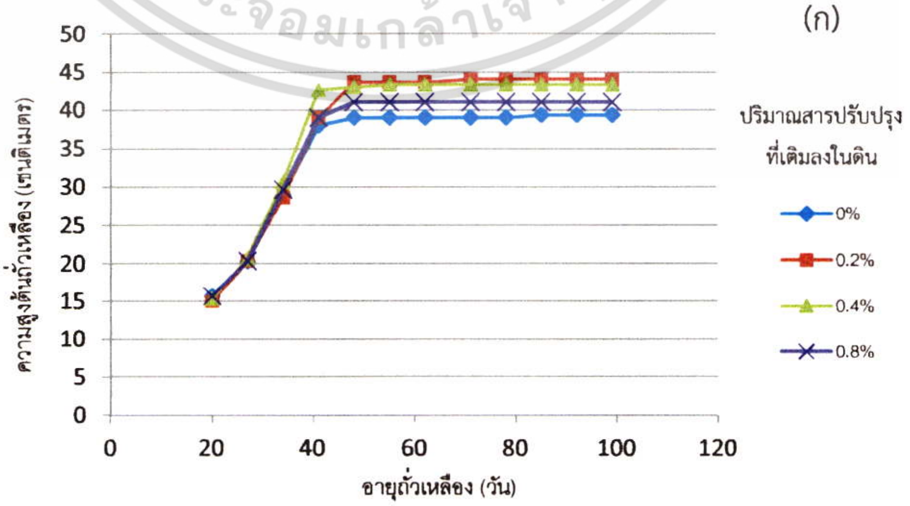
จากการศึกษาความสูง จำนวนฝักของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ปลูกในดินปนเปื้อนโลหะหนักและทำการเติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน+ซีพิโอไลท์) ในอัตราส่วนต่างๆ กัน เพื่อประเมินการเจริญเติบโตของถั่วเหลืองว่าอัตราส่วนใดเหมาะสมหรือมีส่วนช่วยให้ถั่วเหลืองเจริญเติบโตได้มากที่สุด ผลการทดลองมีดังนี้

4.3.1 ความสูงของต้นถั่วเหลือง

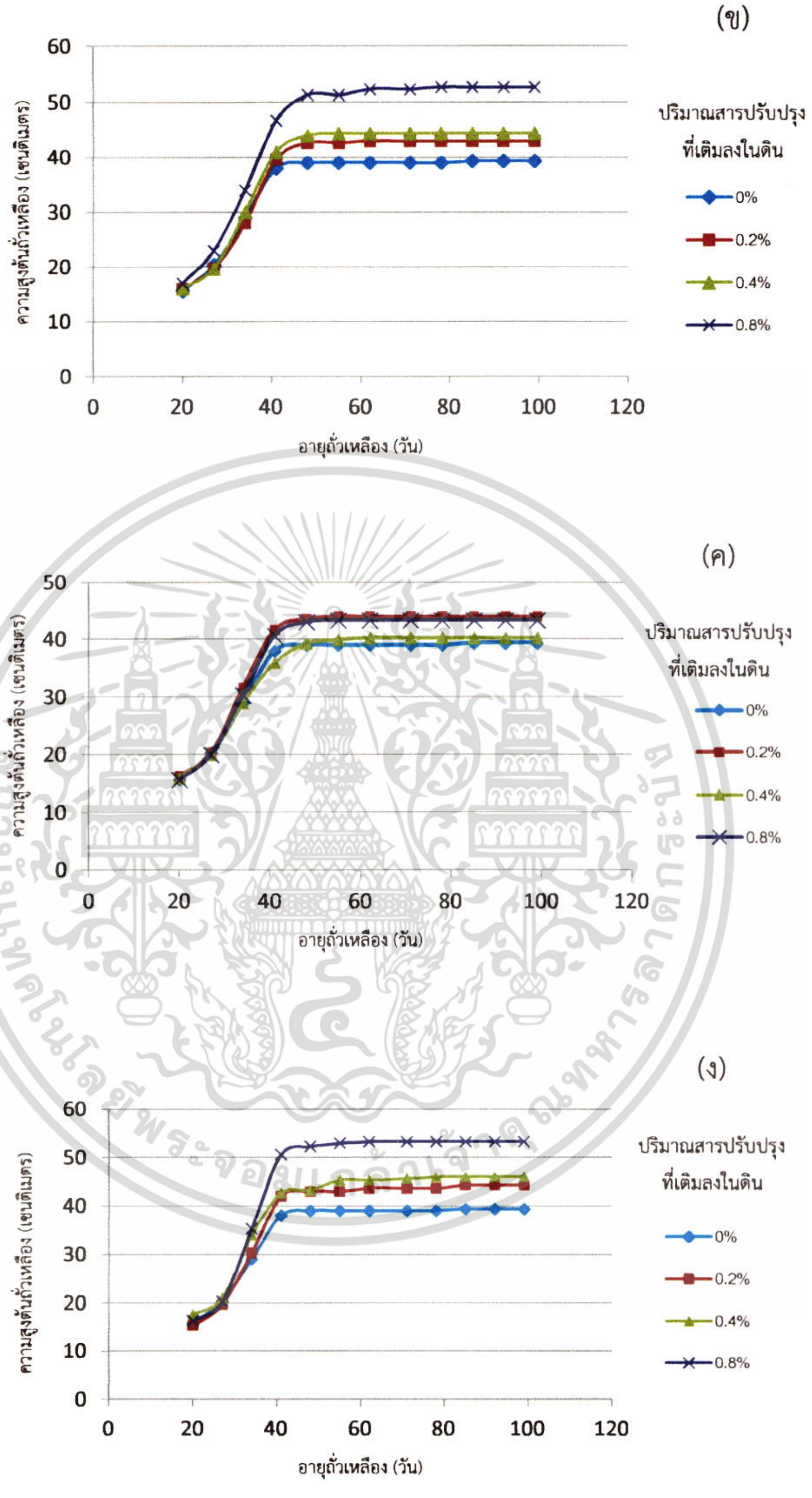
ทำการวัดความสูงโดยเก็บข้อมูลทุกสัปดาห์ ตั้งแต่เริ่มนำกล้าลงกระถางจนถึงก่อนเก็บเกี่ยว จากข้อมูลถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ปลูกในดินจังหวัดฉะเชิงเทรา ใช้ระยะเวลาการปลูกทั้งหมด 110 วัน พบว่าหลังจากย้ายกล้าถั่วเหลืองลงปลูกในกระถางพลาสติก ต้นถั่วเหลืองมีความสูงเฉลี่ย 38 เซนติเมตร (ทุกชุดการทดลอง) โดยเฉลี่ยถั่วเหลืองจะมีลักษณะทรงพุ่ม ความสูงประมาณ 30-150 เซนติเมตร การเจริญเติบโตของถั่วเหลืองแบ่งได้ออกเป็น 2 ส่วน คือการเจริญเติบโตทางลำต้นและทางด้านการเจริญพันธุ์ ซึ่งการเจริญเติบโตทางลำต้นจะเริ่มตั้งแต่พืชเริ่มงอกพ้นดิน สร้างราก ลำต้น ใบ และสิ้นสุดการเจริญเติบโตทางลำต้นเมื่อถั่วเหลืองเริ่มติดฝัก (กรมวิชาการเกษตร, 2547)

จากการวัดความสูงต้นถั่วเหลือง พบว่าถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่เติมสารปรับปรุงดินในปริมาณ 0.8% โดยมีอัตราส่วนหินปูน:ซีพิโอไลท์ 2:1 และ 0:1 มีความสูงมากที่สุดเฉลี่ย 52-53 เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้เติมสารปรับปรุงดินพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งความสูงของต้นถั่วเหลืองมีความสอดคล้องกับความสูงของผลผลิตถั่วเหลืองของกรมวิชาการเกษตร (สูงประมาณ 30-150 เซนติเมตร) แต่ให้ผลผลิตเมล็ดในระดับปานกลาง (ตารางที่ 4.6) ซึ่งอาจเกี่ยวข้องปัจจัยทางด้านความอุดมสมบูรณ์ของลำต้นและใบ ทำให้ลำต้นเล็กแต่สูงเพียงอย่างเดียว และปริมาณโลหะหนักในเมล็ดสูงเกินมาตรฐานอาหารจะเป็นอันตรายได้ (ถ้าในดินมีแคดเมียมและตะกั่วในปริมาณสูง) (ตารางที่ 4.7)

(ก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

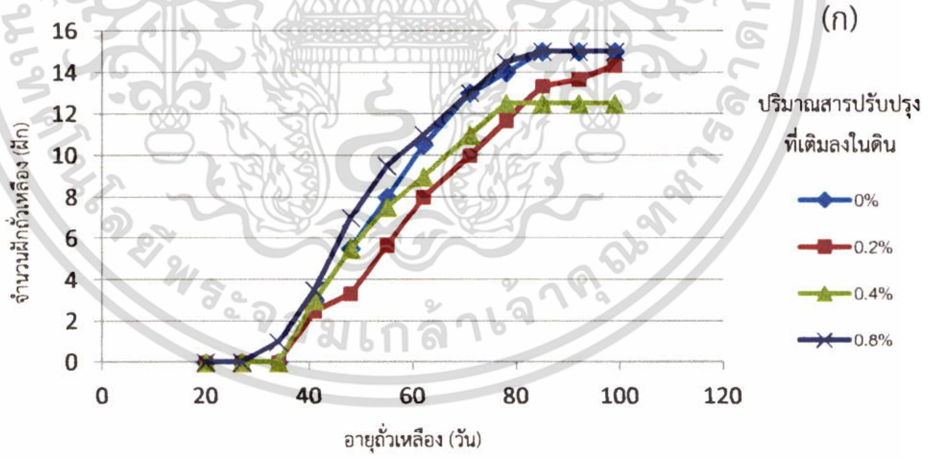


รูปที่ 4.1. ความสูงของต้นถั่วเหลืองที่ปลูกในดินฉะเชิงเทราปนเปื้อนโลหะหนักและปรับปรุงดินด้วยหินปูน: ซีพิโอไลท์ในอัตราส่วน 1:0 (ก), 0:1 (ข), 1:1 (ค) และ 2:1 (ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

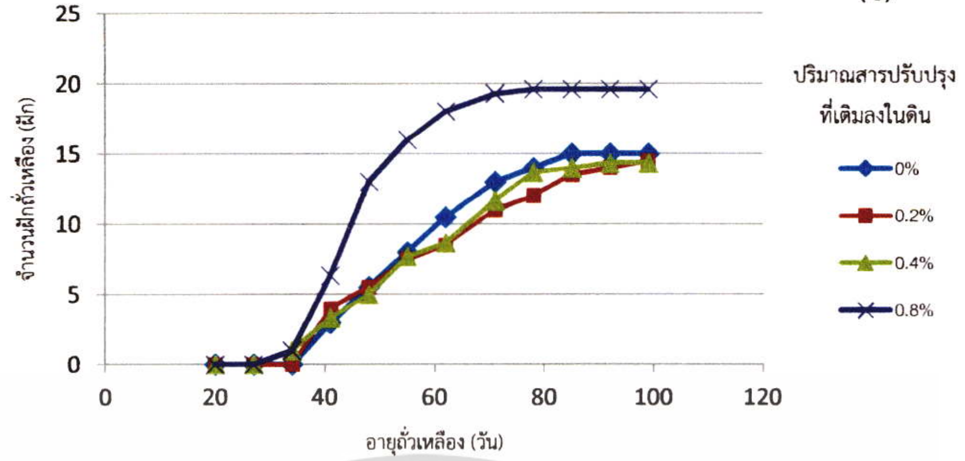
4.3.2 จำนวนฝัก

ผลจากการทดลองการนับจำนวนฝักของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ปลูกในดินฉะเชิงเทรา (รูปที่ 4.2) พบว่าจำนวนฝักของทุกชุดการทดลองให้ผลผลิตจำนวนฝักน้อยกว่าผลผลิตตามไร่ปกติ โดยพบว่าเมื่อเติมสารปรับปรุงดินที่มีส่วนผสมของหินปูน:ซีพิโอไลท์ที่อัตราส่วน 2:1 ลงไปในดิน 0.8 % ทำให้ถั่วเหลืองมีจำนวนฝักมากที่สุดคือ 22 ฝักต่อต้น เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้เติมสารปรับปรุงดินพบว่ามีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งไม่สอดคล้องกับสถาบันวิจัยพืชไร่, 2540 ที่รายงานว่าถั่วเหลืองจะมีจำนวนฝัก 30-50 ฝักต่อต้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบจำนวนฝักกับความสูงของต้นถั่วเหลือง พบว่าเมื่อต้นถั่วเหลืองมีความสูงเพิ่มขึ้น จะทำให้จำนวนฝักเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และผลของจำนวนฝักมีความสอดคล้องกับผลของความสูงของลำต้น (รูปที่ 4.1) ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยในหลายๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นสภาพแวดล้อม ข้อจำกัดที่ต้องปลูกในกระถาง หรืออาจเกี่ยวข้องกับปัจจัยทางด้านการผสมเกสรของถั่วเหลือง ซึ่งมีผลต่อการติดฝักและความลีบของเมล็ด โดยรังสฤษดิ์ (2541) รายงานว่าถั่วเหลืองที่ให้ผลผลิตต่อพื้นที่สูง มีความสูง จำนวนฝักและจำนวนกิ่งมาก ขึ้นอยู่กับพันธุกรรม สภาพแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมและสภาพแวดล้อม ซึ่งทำให้การแสดงออกของแต่ละพันธุ์และลักษณะต่างๆ ในพันธุ์แตกต่างกันออกไปในแต่ละสภาพแวดล้อม

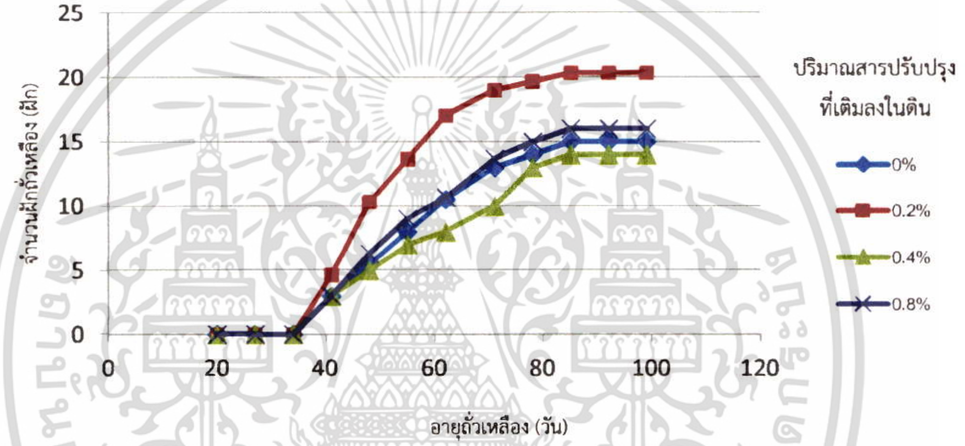


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

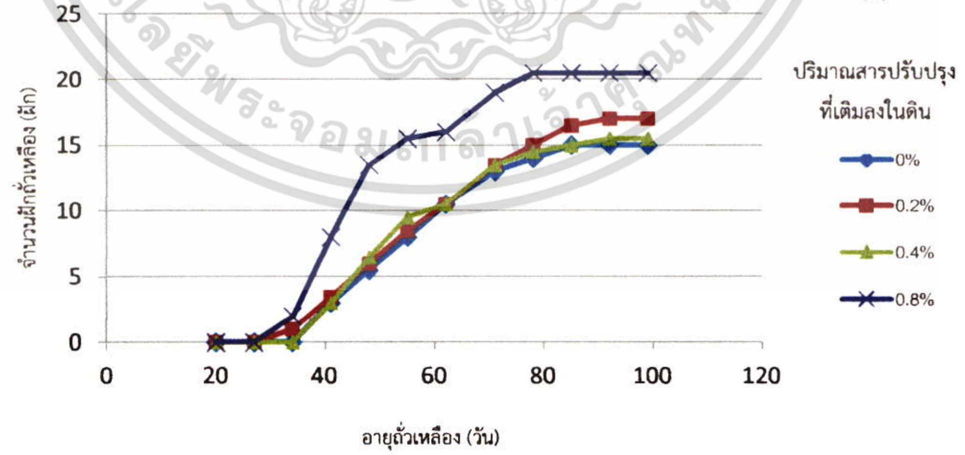
(ข)



(ค)



(ง)



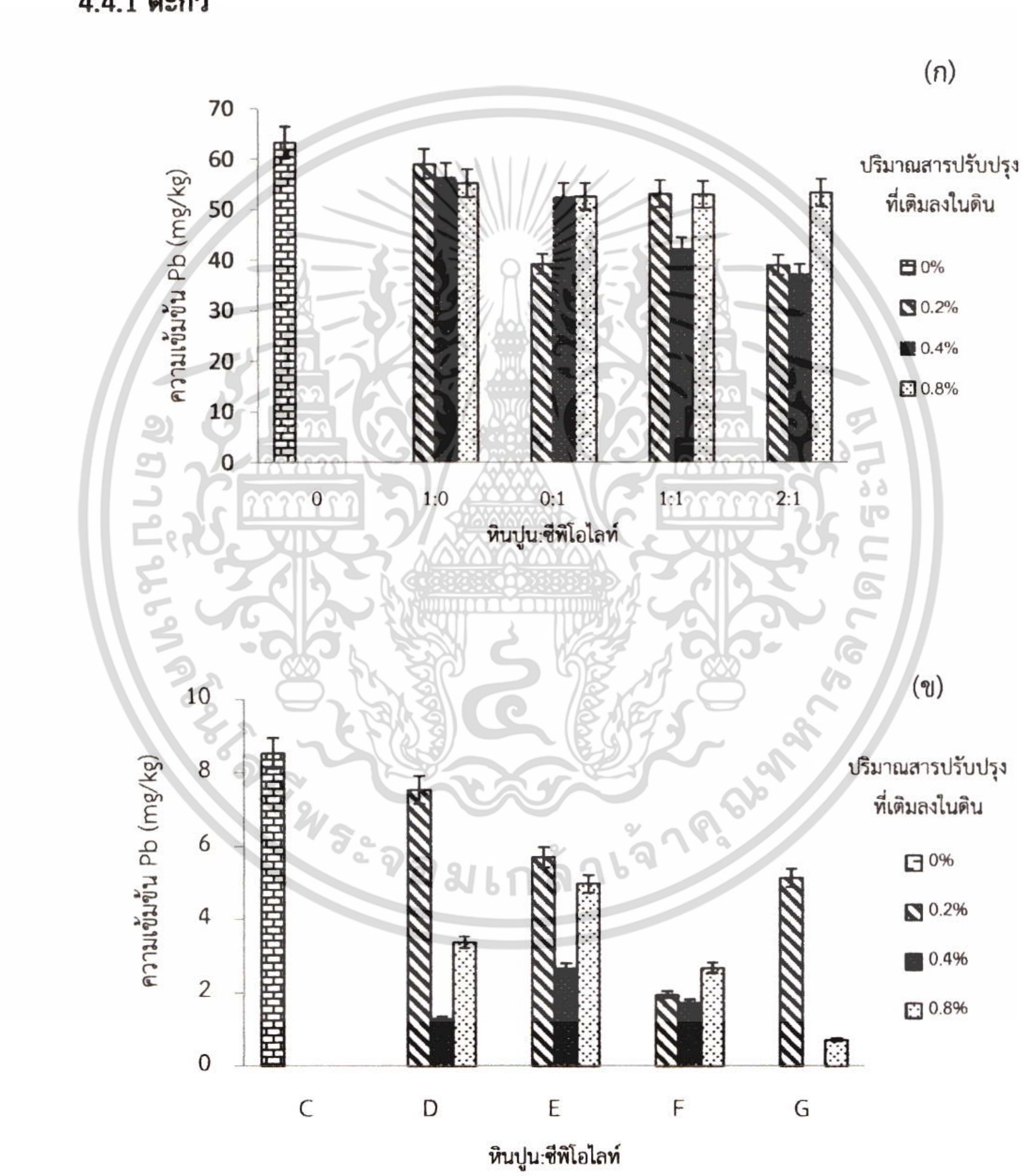
รูปที่ 4.2 จำนวนฝักของต้นถั่วเหลืองที่ปลูกในดินฉะเชิงเทราปนเปื้อนโลหะหนักและปรับปรุงดินด้วย **หินปูน: ซีพิโอไลท์**ในอัตราส่วน 1:0 (ก), 0:1 (ข), 1:1 (ค) และ 2:1 (ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสารปรับปรุงดินต่อการลดลงของโลหะหนักในถั่วเหลือง

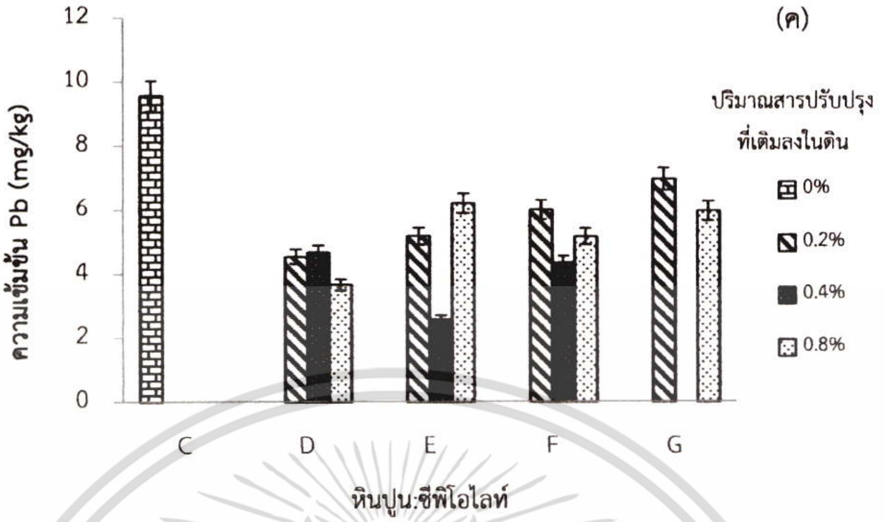
ทำการศึกษาประสิทธิภาพของสารปรับปรุงดินโดยปลูกถั่วเหลืองในดินปนเปื้อนตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม และสังกะสี ทำการเติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน+ซีพิโอไลท์) ในอัตราส่วนต่างๆกัน ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3, 4.4, 4.5 และ 4.6

4.4.1 ตะกั่ว



รูปที่ 4.3 ปริมาณตะกั่วในราก (ก) ต้น+ใบ (ข) ของถั่วเหลืองเมื่อเติมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



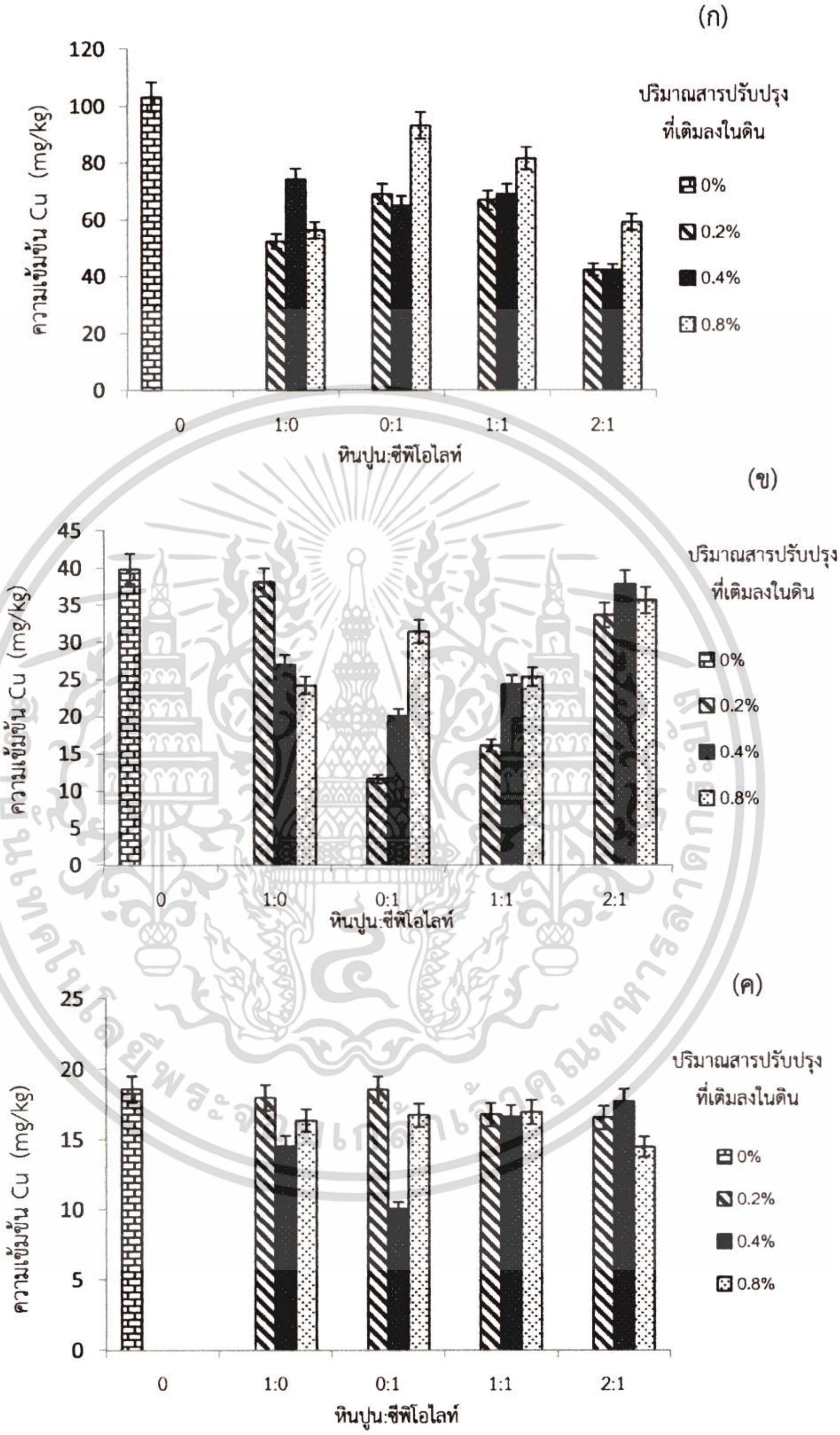
รูปที่ 4.3 (ต่อ) ปริมาณตะกั่วในเมล็ด (ค) ของถั่วเหลืองเมื่อเติมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 เมื่อเติมสารปรับปรุงในอัตราส่วนต่างๆ พบตะกั่วในราก ลำต้น+ใบ และเมล็ด ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการที่ไม่ได้เติมสารปรับปรุงดิน รากมีปริมาณตะกั่วสะสมมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบทางสถิติพบว่าปริมาณตะกั่วที่สะสมในราก ลำต้น+ใบ และเมล็ดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทุกอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เติมลงไปที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับรากเมื่อใช้อัตราส่วน 2:1 ปริมาณ 0.4% ส่งผลให้ปริมาณตะกั่วลดลงมากที่สุด คือ ร้อยละ 41.02 สำหรับผลของสารปรับปรุงดินต่อการสะสมตะกั่วลำต้น+ใบเมล็ดของถั่วเหลือง พบว่า อัตราส่วน 2:1 ปริมาณ 0.4% ไม่มีปริมาณตะกั่วสะสม

อย่างไรก็ตามพบว่าอัตราส่วน 2:1 ที่ปริมาณ 0.4% สามารถลดปริมาณตะกั่วในเมล็ดถั่วเหลืองให้ไม่เกินค่ามาตรฐานอาหารตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 273 พ.ศ. 2546 เรื่อง มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน คือ 1 mg/kg ซึ่งการดูดตะกั่วของถั่วเหลืองส่วนหนึ่งอาจจะเกี่ยวข้องกับรูปฟอร์มของโลหะในดิน (รูปที่ 4.7) จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเติมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ มีรูปฟอร์มที่สิ่งชีวิตนำไปใช้ง่าย (F1-F3) เฉลี่ยเพียงแค่ 10% โดยอัตราส่วน 2:1 ที่ปริมาณ 0.4% มีรูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ยากมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ จึงอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ถั่วเหลืองดูดตะกั่วได้ในปริมาณน้อยกว่าอัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ทองแดง



รูปที่ 4.4 ปริมาณทองแดงในราก (ก) ต้น+ใบ (ข) และเมล็ด (ค) ของถั่วเหลืองเมื่อเติมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ

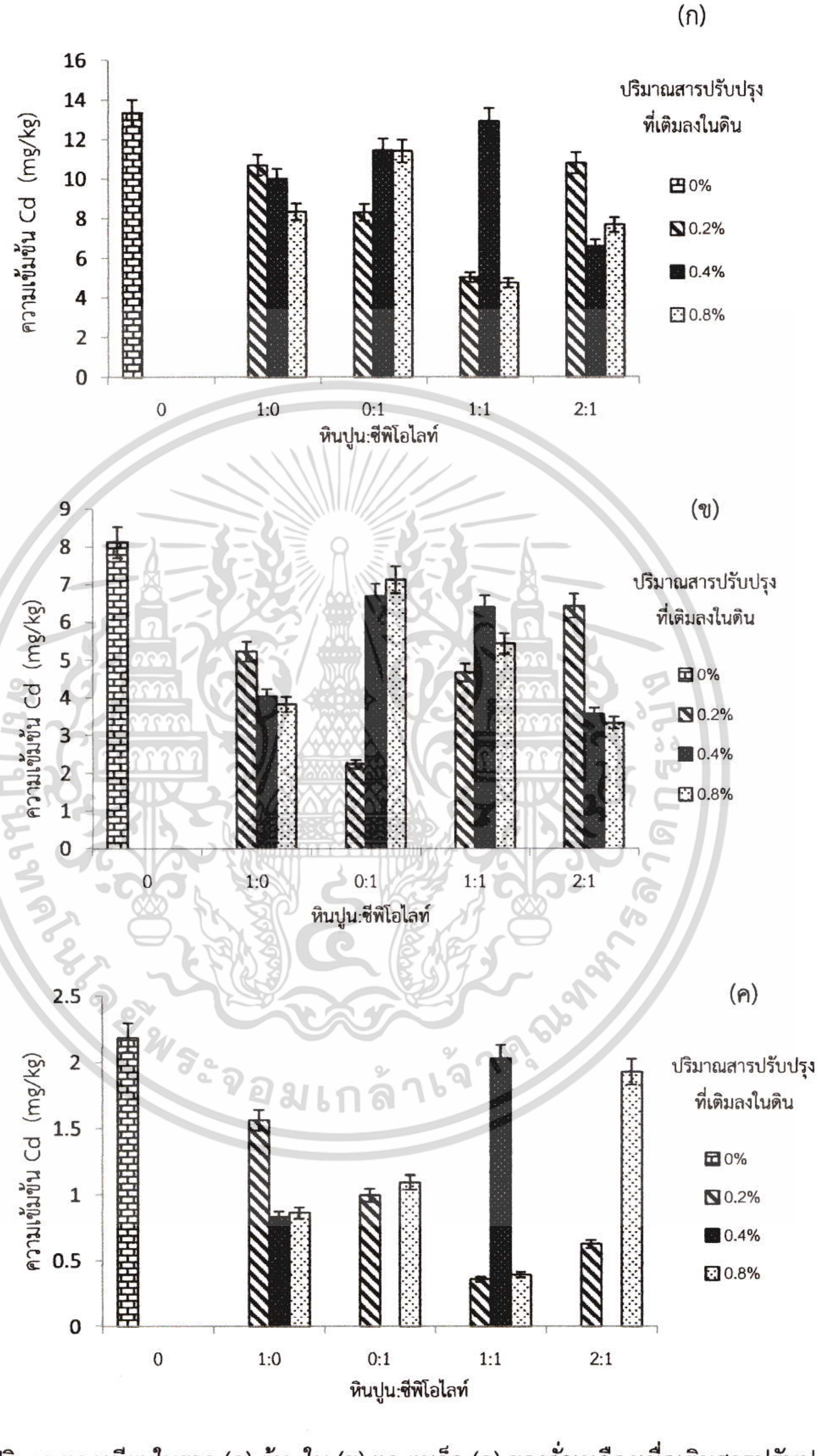
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 พบว่าทองแดงในราก ลำต้น+ใบ และเมล็ด มีความเข้มข้นของทองแดงลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการที่ไม่ได้เติมสารปรับปรุงดิน ในส่วนของรากมีปริมาณทองแดงสะสมมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบทางสถิติพบว่าปริมาณทองแดงที่สะสมในราก ลำต้น+ใบ และเมล็ด มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทุกอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เติมลงในดินที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยเมื่อใช้อัตราส่วน 2:1 ที่ปริมาณ 0.4% และ 0.2% มีปริมาณทองแดงลดลงมากที่สุด คือ ร้อยละ 59.01 และ 58.9 ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราส่วน 0:1 ปริมาณ 0.2% ทำให้มีปริมาณทองแดงสะสมในลำต้น+ใบลดลงมากที่สุด คือ ร้อยละ 71.01 และเมื่อใช้อัตราส่วน 0:1 ปริมาณ 0.4% ปริมาณทองแดงสะสมในเมล็ดลดลงมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 45.82

อย่างไรก็ตามพบว่าอัตราส่วน 1:0 0:1 1:1 และ 2:1 ของสารปรับปรุงดินสามารถลดปริมาณทองแดงในเมล็ดถั่วเหลืองให้ไม่เกินค่ามาตรฐานอาหารตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 273 พ.ศ. 2546 เรื่อง มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน คือ 20 mg/kg ซึ่งการดูดทองแดงของถั่วเหลืองส่วนหนึ่งอาจจะเกี่ยวข้องกับรูปฟอร์มของโลหะในดิน (รูปที่ 4.8) จะเห็นได้ว่าทองแดงส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ยาก จึงอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ถั่วเหลืองดูดทองแดงได้ในปริมาณน้อยและทำให้ไม่มีความแตกต่างกันในแต่ละอัตราส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 แคดเมียม



รูปที่ 4.5 ปริมาณแคดเมียมในราก (ก) ต้น+ใบ (ข) และเมล็ด (ค) ของถั่วเหลืองเมื่อเติมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ

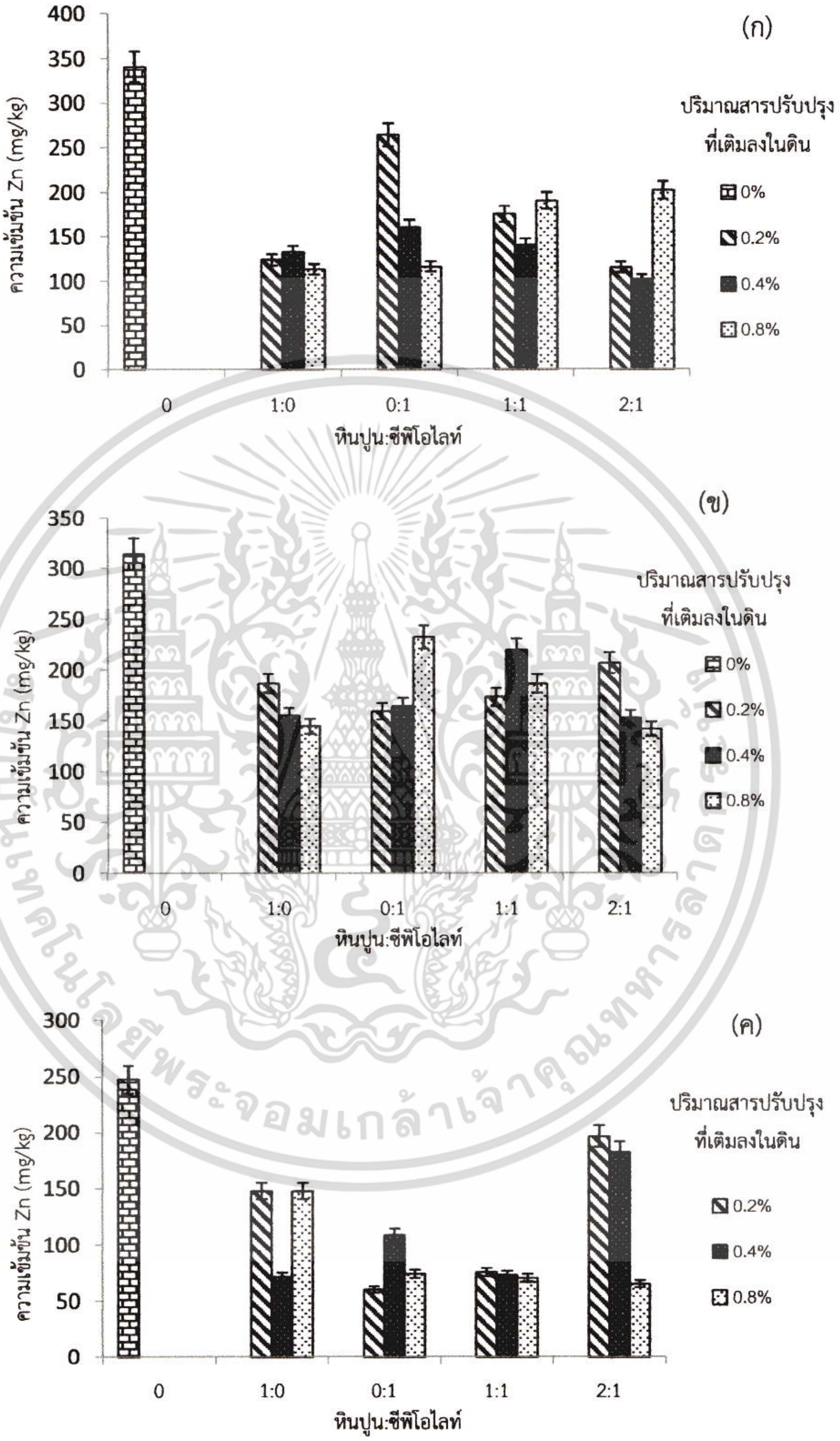
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 เมื่อเติมสารปรับปรุงดิน ส่งผลให้แคดเมียมในราก ลำต้น+ใบ และเมล็ด มีความเข้มข้นของแคดเมียมลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการที่ไม่ได้เติมสารปรับปรุงดิน รากมีปริมาณแคดเมียมสะสมมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบทางสถิติพบว่าปริมาณแคดเมียมที่สะสมในราก ลำต้น+ใบ และเมล็ด มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทุกอัตราส่วนของสารปรับปรุงที่เติมลงไปที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเติมสารปรับปรุงดินอัตราส่วน 1:1 ที่ปริมาณ 0.8% และ 0.2% พบแคดเมียมในรากลดลงร้อยละ 64.33 และ 62.27 ตามลำดับ เมื่อเติมสารปรับปรุงดินอัตราส่วน 0:1 ที่ปริมาณ 0.2% มีปริมาณแคดเมียมสะสมในลำต้น+ใบลดลงมากที่สุด ร้อยละ 72.57 สำหรับเมล็ดปริมาณแคดเมียมไม่มีการสะสมเมื่อเติมสารปรับปรุงในอัตราส่วนดังนี้ คืออัตราส่วน 0:1 และ 2:1 ปริมาณ 0.4%

อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเติมสารปรุงดินในอัตราส่วน 0:1 ปริมาณ 0.4% อัตราส่วน 1:1 ปริมาณ 0.2%, 0.8% และอัตราส่วน 2:1 ปริมาณ 0.2%, 0.4% สามารถลดปริมาณแคดเมียมในเมล็ดถั่วเหลืองให้ไม่เกินค่ามาตรฐานอาหารตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 273 พ.ศ. 2546 เรื่อง มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน คือ 0.8 mg/kg ซึ่งการดูดแคดเมียมของถั่วเหลืองส่วนหนึ่งอาจจะเกี่ยวข้องกับรูปฟอร์มของโลหะในดิน (รูปที่ 4.9) จะเห็นได้ว่าแคดเมียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ง่าย จึงอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ถั่วเหลืองดูดแคดเมียมได้ในปริมาณมากกว่าโลหะหนักตัวอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 สังกะสี



รูปที่ 4.6 ปริมาณสังกะสีในราก (ก) ต้น+ใบ (ข) และเมล็ด (ค) ของถั่วเหลืองเมื่อเติมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 เมื่อเติมสารปรับปรุงดินลงไป จะพบว่าในราก ลำต้น+ใบ และเมล็ด มีความเข้มข้นของสังกะสีลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการที่ไม่ได้เติมสารปรับปรุงดิน ในส่วนของรากมีปริมาณสังกะสีสะสมมากที่สุด เปรียบเทียบทางสถิติพบว่าปริมาณสังกะสีที่สะสมในราก ลำต้น+ใบ และเมล็ด มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทุกอัตราส่วนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเติมสารปรับปรุงดินอัตราส่วน 2:1 ในปริมาณ 0.4% มีปริมาณสังกะสีในรากลดลงมากที่สุด ร้อยละ 70.03 เมื่อเติมสารปรับปรุงดินอัตราส่วน 2:1 และอัตราส่วน 1:0 ในปริมาณ 0.8% มีปริมาณสังกะสีในลำต้น+ใบลดลงมากที่สุด คือร้อยละ 54.83 และ 54.02 ตามลำดับ เมื่อเติมสารปรับปรุงดินอัตราส่วน 0:1 ปริมาณ 0.2% และที่อัตราส่วน 2:1 ในปริมาณ 0.8% ปริมาณสังกะสีในเมล็ดลดลงมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 83.0 และ 78.68 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามพบว่าอัตราส่วน 1:0 ปริมาณ 0.4% อัตราส่วน 0:1 ปริมาณ 0.2% และ 0.8% อัตราส่วน 2:1 ปริมาณ 0.8% และอัตราส่วน 1:1 ในทุกปริมาณของสารปรับปรุงดินสามารถลดปริมาณสังกะสีในเมล็ดถั่วเหลืองให้ไม่เกินค่ามาตรฐานอาหารตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 273 พ.ศ. 2546 เรื่อง มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน คือ 100 mg/kg ซึ่งการดูดสังกะสีของถั่วเหลืองส่วนหนึ่งอาจจะเกี่ยวข้องกับรูปฟอร์มของโลหะในดิน (รูปที่ 4.10) จะเห็นได้ว่าสังกะสีส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ยาก จึงอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ถั่วเหลืองดูดสังกะสีได้ในปริมาณน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 อัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เหมาะสมที่ทำให้โลหะหนักทุกชนิดในเมล็ดมีค่าน้อยที่สุดและที่ไม่เกินค่ามาตรฐานอาหาร

อัตราส่วนหินปูน:ซีพีโอไลท์		โลหะหนัก			
		Pb	Cu	Cd	Zn
ดินควบคุม (0%)			✓		
(1:0)	0.2 %		✓		
	0.4 %		✓		✓
	0.8 %		✓		
(0:1)	0.2 %		✓		✓*
	0.4 %		✓*	✓*	
	0.8 %		✓		✓
(1:1)	0.2 %		✓	✓	✓
	0.4 %		✓		✓
	0.8 %		✓	✓	✓
(2:1)	0.2 %		✓		
	0.4 %	✓*	✓	✓*	
	0.8 %		✓		✓

หมายเหตุ: ✓ คืออัตราส่วนที่ไม่เกินมาตรฐานอาหาร   * คือปริมาณโลหะหนักน้อยที่สุด

จากการทดลองพบว่าการใช้หินปูนและซีพีโอไลท์ทำให้ปริมาณของโลหะหนักในถั่วเหลืองลดลง ซึ่งตารางที่ 4.7 แสดงอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เหมาะสมที่ทำให้โลหะหนักทุกชนิดในเมล็ดไม่เกินค่ามาตรฐานอาหารและที่ทำให้มีปริมาณโลหะหนักในเมล็ดน้อยที่สุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อในดินมีการปนเปื้อนตะกั่วในปริมาณที่ต่ำกว่าระดับเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักในดินของประเทศไทย คือ 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และมีการปนเปื้อนทองแดง แคดเมียม สังกะสี ในปริมาณสูง ควรเลือกเติมหินปูน:ซีพีโอไลท์ อัตราส่วน 1:1 ที่ปริมาณ 0.2% ซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณทองแดง แคดเมียม สังกะสี ให้ผ่านมาตรฐานอาหารได้ นอกจากนั้นยังพบว่าทำให้ผลผลิตถั่วเหลืองสูงสุดอีกด้วย (ตารางที่ 4.6) แต่ถ้าดินมีการปนเปื้อนตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม ในปริมาณสูง และมีการปนเปื้อนสังกะสีในปริมาณที่ต่ำกว่าระดับเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักในดินของประเทศไทยคือ 300 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ควรเลือกเติมหินปูน:ซีพีโอไลท์ อัตราส่วน 2:1 ที่ปริมาณ 0.4% ซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม ให้ผ่านมาตรฐานอาหารได้ ถึงแม้จะมีปริมาณผลผลิตไม่สูงมากนัก แต่ปลอดภัยกว่า ซึ่งตะกั่วมีความเหมือนกับกลุ่มโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท (Alkaline earth) จึงสามารถเข้าไปแทนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคลเซียม (Ca^{2+}) ในแร่ได้ดี (ศุภมาศ, 2540) โดยพบว่าเมื่อเติมหินปูน:ซีพิโอไลท์อัตราส่วน 2:1 จะมีปริมาณแคลเซียมที่มากกว่าอัตราส่วน 1:1 จึงอาจเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ตะกั่วสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีกว่าสังกะสี มีผลทำให้ตะกั่วมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานอาหารและสังกะสีเกินค่ามาตรฐานอาหารในอัตราส่วน 2:1 นอกจากนี้ยังพบว่าถั่วเหลืองสามารถดูดแคดเมียมได้มากที่สุด รองลงมาคือสังกะสี ทองแดง และตะกั่ว ตามลำดับ (ตารางที่ 4.9) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhuang *et al.*, 2013 ที่ทำการปลูกถั่วเหลืองในดินปนเปื้อนโลหะหนักและให้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน การดูดซับของโลหะหนักโดยพืช ปัจจัยหลักขึ้นอยู่กับรูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน โดยเชื่อว่ารูปฟอร์มที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ของโลหะหนักสามารถดูดซับได้ง่ายโดยพืช (Yang *et al.*, 2015) การดูดซับของซีพิโอไลท์ยังเกี่ยวข้องกับค่าความเป็นกรดด่างและความสามารถในการเคลื่อนที่ โดยที่ค่าความเป็นกรดด่างต่ำ อาจมีผลต่อการตรึงโลหะในดิน ดังนั้นจึงต้องเพิ่มหรือเสริมซีพิโอไลท์กับหินปูนเพื่อเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างในดิน (Ayuso and Sanchez, 2003)

โดยหินปูนมีส่วนช่วยในการตรึงโลหะหนักด้วยการเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างในดิน และเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน (Zeng *et al.*, 2012) ซึ่งที่อัตราส่วน 1:0 (หินปูน:ซีพิโอไลท์) คือเติมหินปูนเพียงชนิดเดียวอาจไม่ส่งผลดีเท่าที่ควรในการตรึงโลหะ ซีพิโอไลท์เป็นวัสดุที่มีพื้นผิวและโครงสร้างรูพรุนที่ดี มีคุณสมบัติในการดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนที่เหมาะสม (Ca, Mg, Si) ในชั้นโครงสร้าง จึงทำให้การเติมซีพิโอไลท์เพียงอย่างเดียว (0:1) ก็สามารถช่วยลดความเข้มข้นของโลหะหนักได้ดีเช่นเดียวกัน แต่เมื่อเติมสารปรับปรุงรวม (หินปูน:ซีพิโอไลท์) ในอัตราส่วน 1:1 หรือ 2:1 ส่งผลให้สามารถลดความเข้มข้นของโลหะหนักในเมล็ดและรากได้มากที่สุด โดยพบว่าสารปรับปรุงรวมทั้งสองชนิดมีกลไกที่แตกต่างกันของการทำงานโดยทำให้เกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันในเวลาเดียวกัน จึงทำให้เกิดความสามารถดูดซับโลหะหนักได้ในสองปฏิกิริยาพร้อมกัน (Zeng *et al.*, 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้น

การสกัดลำดับขั้น (Sequential extraction) เป็นการประเมินความเสี่ยงของโลหะหนักที่จะเคลื่อนที่สู่สิ่งมีชีวิต และเป็นการแยกรูปฟอร์มของโลหะออกเป็น 6 ส่วน คือ ส่วนที่ละลายน้ำได้ (F1) ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (F2) ส่วนที่ตรึงกับคาร์บอเนต (F3) ส่วนที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) ส่วนที่ตรึงกับสารอินทรีย์ (F5) และส่วนที่เหลือตกค้าง (F6) โดยสามารถจำแนกรูปฟอร์มของโลหะหนักตามความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ง่ายหรือยากได้เป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่สามารถเคลื่อนที่สู่สิ่งมีชีวิตได้ง่าย คือ F1-F3 และรูปแบบที่สามารถเคลื่อนที่สู่สิ่งมีชีวิตได้ยาก คือ F4-F6 โดยวิเคราะห์ดินสังเคราะห์ที่เติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน:ซีพิโอไลท์) ก่อนและหลังการปลูกถั่วเหลือง ในอัตราส่วนต่างๆกัน ดังนี้ คือ 1:0(D), 0:1(E), 1:1(F) และ 2:1(G) ที่ปริมาณ 0.2% (X), 0.4% (Y), 0.8% (Z) สำหรับชุดควบคุมจะไม่เติมสารปรับปรุงดิน (C) ลงไป

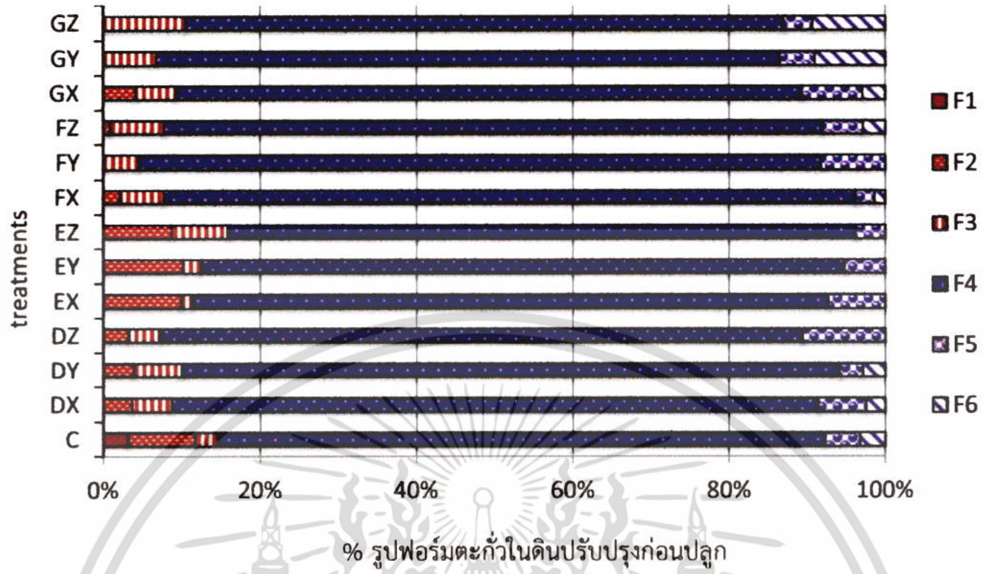
4.5.1 ตะกั่ว

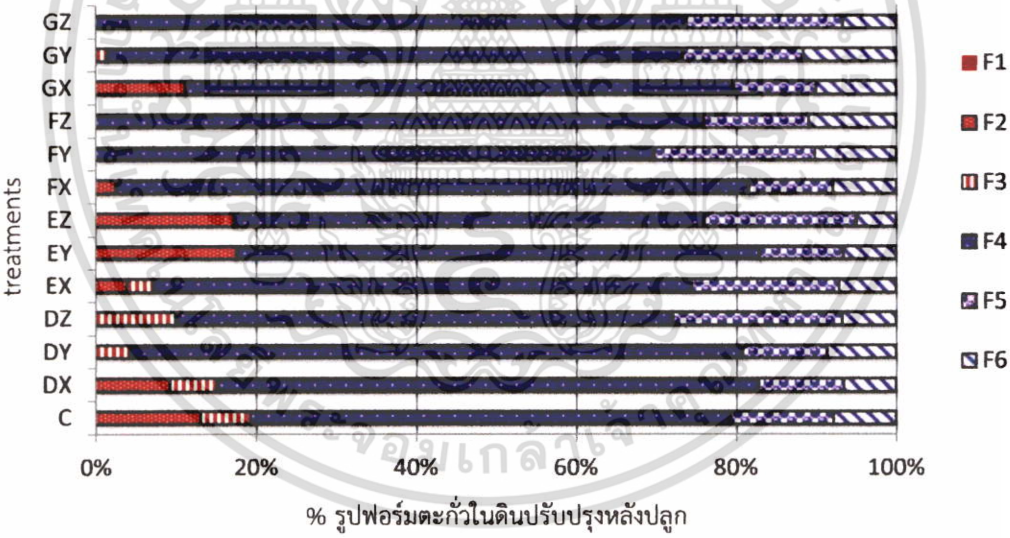
จากรูปที่ 4.7 พบว่าในอัตราส่วนต่างๆ คือ 1:0(D), 0:1(E), 1:1(F) และ 2:1(G) ที่ปริมาณ 0.2% (X), 0.4% (Y), 0.8% (Z) และชุดควบคุม (C) รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของตะกั่วพบในขั้นที่ 4 รูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (F4) เฉลี่ยร้อยละ 82.1 รองลงมาคือขั้นที่ 5 ส่วนที่ตรึงกับสารอินทรีย์ (F5) เฉลี่ยร้อยละ 5.6 สำหรับดินปรับปรุงหลังปลูกถั่วเหลือง รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของตะกั่วพบในขั้นที่ 4 รูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (F4) เฉลี่ยร้อยละ 82.3 รองลงมาคือขั้นที่ 5 ส่วนที่ตรึงกับสารอินทรีย์ (F5) เฉลี่ยร้อยละ 8.2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Abad-Valle et al. 2016 ที่รายงานว่า พบตะกั่วได้มากในรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ โดยรูปแบบโลหะที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ อาจจะเป็นรูปแบบของโลหะที่ดูดซับบนแร่ดินเหนียว และรูปแบบที่ดูดซับบนสารประกอบออกไซด์ (นัทธีรา, 2541) ซึ่งจากการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง (ตารางที่ 4.1) มีดินเหนียวเป็นส่วนประกอบซึ่งในแร่ดินเหนียวนี้ประกอบไปด้วยแผ่นอลิมินาและซิลิกา เมื่อมีการแตกหักบริเวณขอบผลึกจึงทำให้เกิดประจุลบซึ่งเป็นบริเวณที่มีการดูดยึดแคตไอออนไว้ (ปฐพีวิทยา, 2548) อาจส่งผลให้สามารถดูดซับตะกั่วได้ และอาจเนื่องด้วยเมื่อเติมสารปรับปรุงดินที่เป็นแร่ดินเหนียวหรือมีส่วนประกอบของออกไซด์เป็นหลัก (ตารางที่ 4.3) ทำให้ตะกั่วส่วนใหญ่จึงอยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) และยังทำให้ตะกั่วไม่มีส่วนชะละลายได้ คือรูปฟอร์มที่ละลายน้ำได้ (F1) ในดินก่อนปลูกที่เติมสารปรับปรุงดินเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้เติมสารปรับปรุงดิน (C)

จากรูปที่ 4.7 พบว่าชุดควบคุมที่ไม่เติมสารปรับปรุงดิน (C) มีส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ร้อยละ 14.55 และในทุกปริมาณสารปรับปรุงดินที่เติมลงไปในดิน สามารถช่วยลดปริมาณตะกั่วที่จะเคลื่อนที่สู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยในดินปรับปรุงก่อนปลูกมีรูปฟอร์ม F1-F3 มากกว่าในดินปรับปรุงหลังปลูก เพราะพืชมีการดูดรูปฟอร์มเหล่านั้นไปมากแล้ว จึงทำให้ในดินหลังปลูกมีรูปฟอร์ม F4-F6 เพิ่มมากขึ้น ซึ่งรูปฟอร์มของดินปรับปรุงก่อนปลูกมีความสอดคล้องกับปริมาณตะกั่วที่ถั่วเหลืองดูดไป โดยในทุกปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารปรับปรุงที่เติมลงไปรูปฟอร์ม F1-F3 เฉลี่ยมีเพียงร้อยละ 10 ซึ่งทำให้ถั่วเหลืองสามารถดูดตะกั่วได้ในปริมาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับโลหะหนักชนิดอื่นๆ (ตารางที่ 4.9)





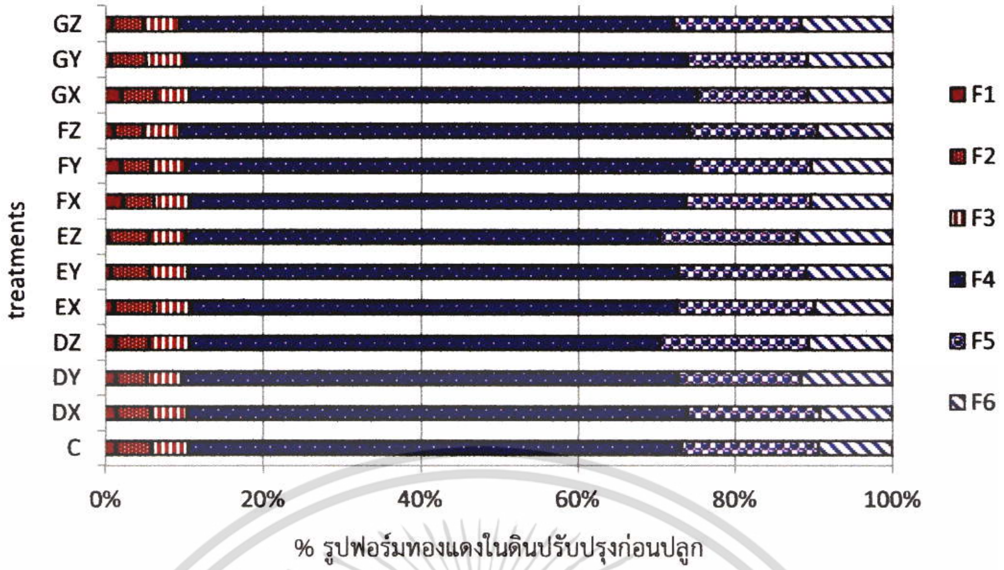
รูปที่ 4.7 สัดส่วนรูปฟอร์มตะกั่วในดินปรับปรุงก่อนและหลังปลูกพืชที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้น 6 ขั้นตอน

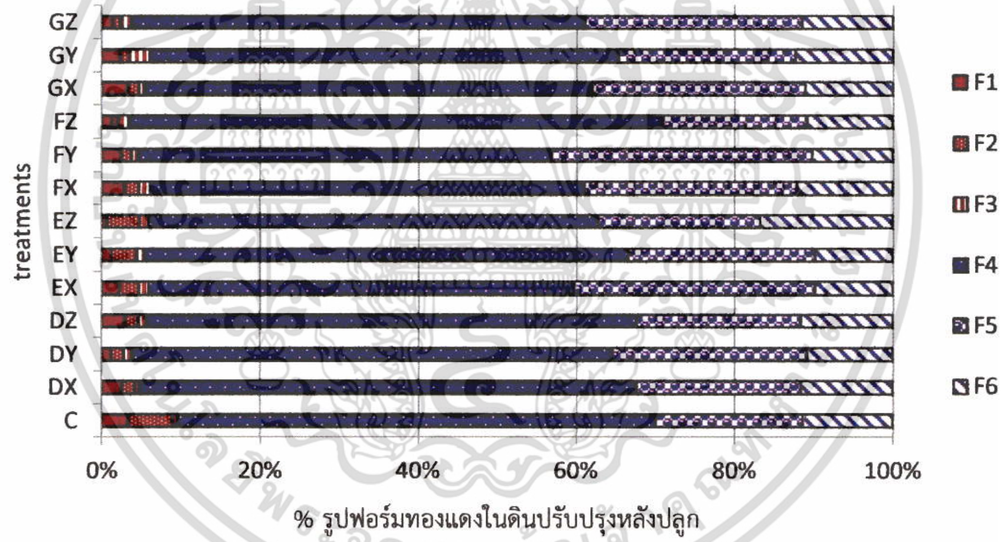
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ทองแดง

จากรูปที่ 4.8 พบว่ารูปฟอร์มส่วนใหญ่ของทองแดงพบในขั้นที่ 4 คือรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (F4) เฉลี่ยร้อยละ 59.21 รองลงมาคือขั้นที่ 5 ส่วนที่ตรึงกับสารอินทรีย์ (F5) เฉลี่ยร้อยละ 16.25 สำหรับดินปรับปรุงหลังปลูกถั่วเหลือง พบว่าในทุกปริมาณสารปรับปรุงดินที่เติมลงไปในดิน รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของทองแดงพบในขั้นที่ 4 คือรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (F4) เฉลี่ยร้อยละ 55.28 รองลงมาคือขั้นที่ 5 ส่วนที่ตรึงกับสารอินทรีย์ (F5) เฉลี่ยร้อยละ 23.34 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lukowski and Wiater, 2009 ที่รายงานว่า พบทองแดงได้มากในรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ จากรูปที่ 4.8 ในดินปรับปรุงก่อนการปลูกถั่วเหลือง พบว่าชุดควบคุมที่ไม่เติมสารปรับปรุงดิน (C) มีส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ ร้อยละ 10.47 ซึ่งรูปแบบโลหะที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ มีความคล้ายคลึงกับตะกั่ว ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว (หัวข้อ 4.5.1) ทำให้ทองแดงส่วนใหญ่จึงอยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) ซึ่งในทุกปริมาณของสารปรับปรุงดินที่เติมลงไปในดินไม่สามารถช่วยลดปริมาณทองแดงที่จะเคลื่อนที่สู่สิ่งมีชีวิตได้ ซึ่งเปรียบเทียบทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยในดินปรับปรุงก่อนปลูกมีรูปฟอร์ม F1-F3 มากกว่าในดินปรับปรุงหลังปลูก เพราะพืชมีการดูดรูปฟอร์มเหล่านั้นไปมากแล้ว จึงทำให้ในดินปรับปรุงหลังปลูกมีรูปฟอร์ม F4-F6 เพิ่มมากขึ้น โดยในทุกปริมาณสารปรับปรุงที่เติมลงไปรูปฟอร์ม F1-F3 เฉลี่ยมีเพียงร้อยละ 10 ซึ่งทำให้ถั่วเหลืองสามารถดูดทองแดงได้ในปริมาณน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 4.8 สัดส่วนรูปฟอร์มทองแดงในดินปรับปรุงก่อนและหลังปลูกพืชที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้น 6 ขั้นตอน

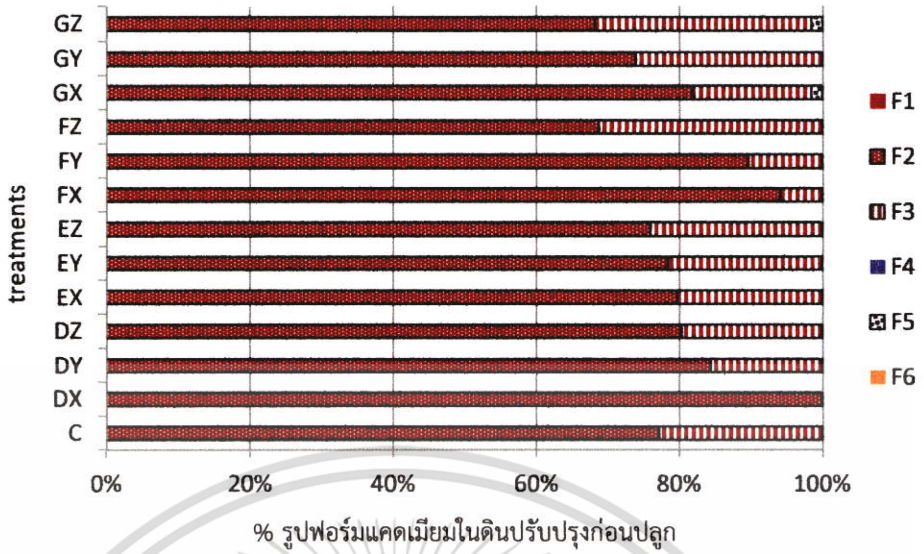
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

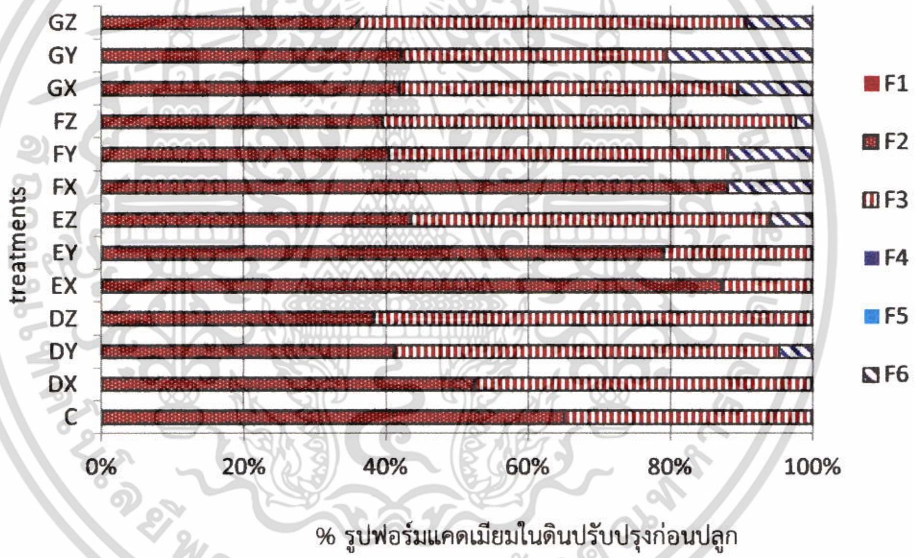
4.5.3 แคดเมียม

จากรูปที่ 4.9 พบว่าในทุกปริมาณสารปรับปรุงดินรูปฟอร์มส่วนใหญ่ของแคดเมียมพบในขั้นที่ 2 คือ ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (F2) เฉลี่ยร้อยละ 80.8 รองลงมาคือ ขั้นที่ 3 ส่วนที่ตรึงกับคาร์บอเนต (F3) เฉลี่ยร้อยละ 18.97 สำหรับในดินปรับปรุงหลังปลูกถั่วเหลือง รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของแคดเมียมพบในขั้นที่ 2 คือ ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (F2) เฉลี่ยร้อยละ 49.63 รองลงมาคือ ขั้นที่ 3 ส่วนที่ตรึงกับคาร์บอเนต (F3) เฉลี่ยร้อยละ 44.86 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Favas *et al.*, 2011 ที่รายงานว่าแคดเมียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอร์มในส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ประมาณ 9.1-69.6%

จากรูปที่ 4.9 พบว่าดินปรับปรุงก่อนปลูกมีรูปแบบที่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ง่าย (F1-F3) 100% ในแทบทุกปริมาณสารปรับปรุงดินที่เติมลงไปในดิน สอดคล้องกับ Sager *et al.*, 2007 ที่รายงานว่าใน 5 รูปฟอร์ม รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้แคดเมียมละลายในดิน จึงสามารถเข้าสู่รากพืชได้ง่าย ซึ่งจากการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง (ตารางที่ 4.1) อาจเกี่ยวข้องกับความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่างแคดเมียมกับดินหรือสารปรับปรุงดิน และการเติมหินปูนที่มีส่วนประกอบของคาร์บอเนต (ตารางที่ 4.3) ทำให้แคดเมียมส่วนใหญ่จึงอยู่ในรูปฟอร์มที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (F2) และอยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงกับคาร์บอเนต (F3) ซึ่งสอดคล้องกับผลโลหะหนักในถั่วเหลืองที่บ่งชี้ได้ว่าถั่วเหลืองสามารถดูดแคดเมียมได้มากกว่าโลหะชนิดอื่นๆ (ตารางที่ 4.9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





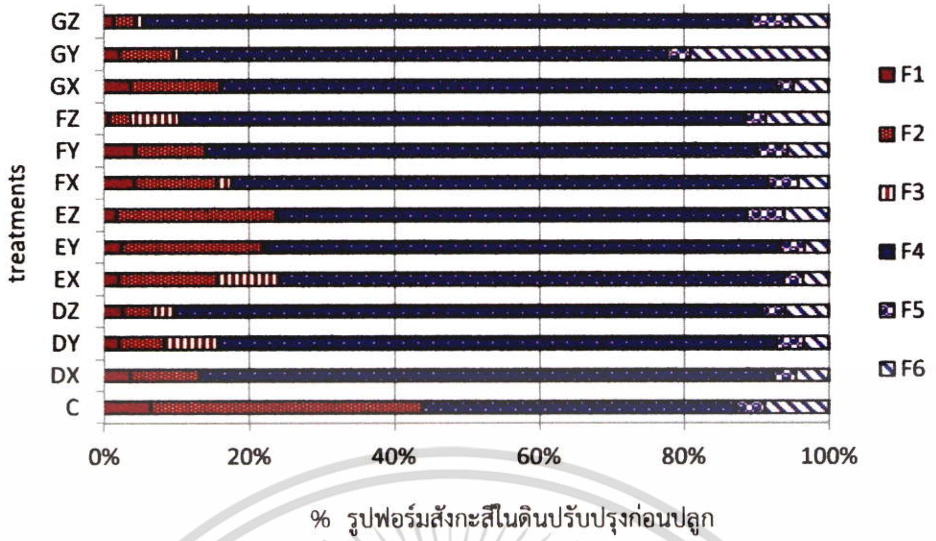
รูปที่ 4.9 สัดส่วนรูปฟอร์มแคดเมียมในดินปรับปรุงก่อนและหลังปลูกพืชที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้น 6 ขั้นตอน

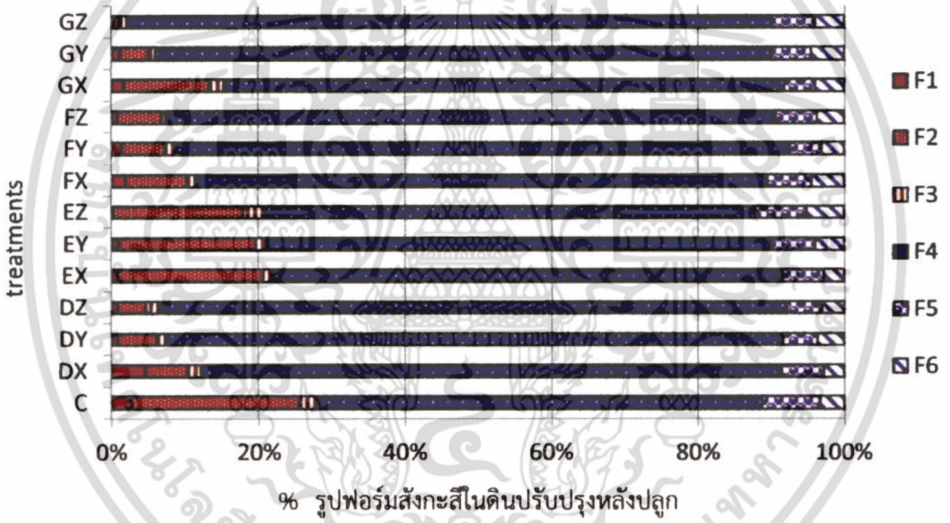
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.4 สังกะสี

จากรูปที่ 4.10 พบว่าในทุกปริมาณสารปรับปรุงดินที่เติมลงไปในดินรูปฟอร์มส่วนใหญ่ของสังกะสีพบในขั้นที่ 4 คือรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (F4) เฉลี่ยร้อยละ 69.44 รองลงมาคือขั้นที่ 2 ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (F2) เฉลี่ยร้อยละ 12.56 สำหรับในดินปรับปรุงหลังปลูกถั่วเหลือง รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของสังกะสีพบในขั้นที่ 4 รูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (F4) เฉลี่ยร้อยละ 74.49 รองลงมาคือขั้นที่ 2 ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (F2) เฉลี่ยร้อยละ 9.54 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สิทธิชัย, 2558 ที่รายงานว่า พบสังกะสีได้มากในรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งรูปแบบโลหะที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ มีความคล้ายคลึงกับตะกั่ว ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว (หัวข้อ 4.5.1) จึงอาจส่งผลให้สังกะสีส่วนใหญ่จึงอยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) จากรูปที่ 4.10 สำหรับดินปรับปรุงก่อนปลูกพบว่าชุดควบคุมที่ไม่เติมสารปรับปรุงดิน (C) มีส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ร้อยละ 43.93 และในทุกปริมาณสารปรับปรุงดินที่เติมลงไปในดิน สามารถช่วยลดปริมาณสังกะสีที่จะเคลื่อนที่สู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยในดินปรับปรุงก่อนปลูกมีรูปฟอร์ม F1-F3 มากกว่าในดินปรับปรุงหลังปลูก อาจเป็นเพราะพืชมีการดูดรูปฟอร์มเหล่านั้นไปมากแล้ว จึงทำให้ในดินปรับปรุงหลังปลูกมีรูปฟอร์ม F4-F6 เพิ่มมากขึ้น ซึ่งรูปฟอร์มของดินปรับปรุงก่อนปลูกมีความสอดคล้องกับปริมาณสังกะสีที่ถั่วเหลืองดูดไป โดยในทุกปริมาณสารปรับปรุงที่เติมลงไปมีรูปฟอร์ม F1-F3 เฉลี่ยประมาณร้อยละ 20 ซึ่งทำให้ถั่วเหลืองสามารถดูดสังกะสีได้ในปริมาณที่มากรองจากแคดเมียม (ตารางที่ 4.9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 4.10 สัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีในดินปรับปรุงก่อนและหลังปลูกพืชที่วิเคราะห์ด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้น 6 ขั้นตอน

จากการทดลองข้างต้นจึงสรุปได้ว่าในทุกปริมาณสารปรับปรุงดินที่เติมลงในดินปรับปรุงก่อนและหลังการปลูกถั่วเหลือง รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของตะกั่ว ทองแดง สังกะสีพบในขั้นที่ 4 คือรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (F4) แคดเมียมส่วนใหญ่พบในขั้นที่ 2 คือส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (F2) ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและความเข้มข้นของโลหะหนัก รวมถึงการกระจายตัวของแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีในฟอร์มทางเคมีของดิน โดยโลหะหนักอาจมีการโยกย้ายหรือการแข่งขันกันในดิน (Wang *et al.*, 2010) ซึ่งผลการสกัดลำดับขั้นนี้มีความสอดคล้องกับผลของโลหะหนักในถั่วเหลือง โดยพบว่าถั่วเหลืองสามารถดูดแคดเมียมได้มากที่สุด รองลงมา คือ สังกะสี ทองแดง และตะกั่ว ตามลำดับ (ตารางที่ 4.9) โดยมีหลากหลายงานวิจัยรายงานว่าหินปูนมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพสูงในการลดรูปฟอร์มการละลายน้ำของแคดเมียมและตะกั่วได้ เนื่องมาจากความเป็นด่างที่สูงที่เกิดจาก Ca และ $CaCO_3$ ที่มีปริมาณมาก (Shaheen and Rinklebe, 2014) โดย Sun *et al.*, 2013 รายงานว่าเมื่อเติมซีพิโอไลท์สามารถช่วยลดรูปฟอร์มการสะสมของแคดเมียมในดินและสามารถยับยั้งการเคลื่อนย้ายแคดเมียมจากดินสู่ต้นผักโขม สามารถช่วยลดรูปฟอร์มที่ละลายน้ำได้และรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ของโลหะหนักในดิน โดยสามารถเพิ่มรูปฟอร์มของคาร์บอเนต เหล็กและแมงกานีสออกไซด์ และรูปฟอร์มที่เหลือตกค้าง (Liang *et al.*, 2014) ซึ่งความสัมพันธ์ของรูปฟอร์มโลหะหนักในดินขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดด่าง, CEC และ OM ในดินซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมการกระจายตัวของโลหะหนักในดิน เมื่อความเป็นกรดด่างในดินเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการดูดซับกับส่วนประกอบในดิน และเกิดการตกตะกอน มีการแทนที่ในโครงสร้างแมกนีเซียมที่ขอบ octahedral sheets ของซีพิโอไลท์ ทำให้โลหะหนักไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Liang *et al.*, 2014) โครงสร้างรูพรุน หมู่ฟังชั่นที่ว่องไว ค่าความเป็นกรดด่างและ CEC ที่สูง มีส่วนช่วยทำให้โลหะหนักไม่เคลื่อนที่ (Park *et al.*, 2011) CEC สามารถบอกถึงความในการสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกและยังมีบทบาทที่สำคัญในการตรึงโลหะหนักในดิน ซึ่งซีพิโอไลท์มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มากและมีปริมาณประจุบวกมาก (Mg^{2+}, Ca^{2+}, K^{+}, Al^{3+}, Si^{2+}) (Sun *et al.*, 2013) การใช้สารปรับปรุงรวมหินปูน+ ซีพิโอไลท์จึงช่วยเพิ่มความสามารถของดินในการดูดซับและแลกเปลี่ยนโลหะหนัก ดังนั้นโลหะอาจจะถูกยับยั้งผ่านการดูดซับที่จำเพาะหรือการดูดซับทางเคมี (Lee *et al.*, 2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก (Translocation factor, TF)

การศึกษาอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักในรากและเมล็ด สามารถบ่งชี้ได้ว่ามีการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากรากไปสู่เมล็ดถั่วเหลืองมากน้อยเพียงใด จากการนำข้อมูลความเข้มข้นของตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) และสังกะสี (Zn) ในเมล็ดและรากของถั่วเหลือง มาคำนวณการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากรากสู่เมล็ด (ตารางที่ 4.8) พบว่าสังกะสีมีผลการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากรากสู่เมล็ดมากที่สุด รองลงมาคือ ทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว ตามลำดับ โดยจากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าสังกะสี ทองแดง แคดเมียม และตะกั่วมีการเคลื่อนที่จากรากสู่เมล็ดในปริมาณต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhou *et al.*, 2013 ที่ทำการปลูกถั่วเหลืองในดินปนเปื้อนโลหะหนัก และให้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.8 การเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากรากสู่เมล็ดถั่วเหลืองที่ปลูกในดินฉะเชิงเทราผสมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ (Mean ± S.D.)

ชุดการทดลอง	Pb เมล็ด/ราก	Cu เมล็ด/ราก	Cd เมล็ด/ราก	Zn เมล็ด/ราก
C	0.04 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.10 ± 0.01	0.13 ± 0.01
DX	0.03 ± 0.01	0.08 ± 0.00	0.09 ± 0.01	0.21 ± 0.02
DY	0.03 ± 0.02	0.07 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.11 ± 0.02
DZ	0.03 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.27 ± 0.02
EX	0.04 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.10 ± 0.02	0.05 ± 0.01
EY	0.01 ± 0.01	0.05 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.14 ± 0.01
EZ	0.05 ± 0.05	0.10 ± 0.02	0.05 ± 0.01	0.16 ± 0.03
FX	0.08 ± 0.08	0.21 ± 0.02	0.03 ± 0.03	0.22 ± 0.02
FY	0.08 ± 0.02	0.14 ± 0.03	0.11 ± 0.01	0.16 ± 0.04
FZ	0.05 ± 0.04	0.13 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.15 ± 0.03
GX	0.05 ± 0.05	0.11 ± 0.02	0.04 ± 0.01	0.33 ± 0.05
GY	0.00 ± 0.00	0.10 ± 0.01	0.00 ± 0.00	0.35 ± 0.04
GZ	0.08 ± 0.07	0.10 ± 0.03	0.12 ± 0.05	0.12 ± 0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ปัจจัยการสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation factor, BAF)

ปัจจัยการสะสมทางชีวภาพ คือ อัตราส่วนของความเข้มข้นของโลหะในมวลพืชต่อความเข้มข้นของโลหะที่เหลือในดินหลังปลูกพืชแล้ว ซึ่งจะบ่งชี้ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายโลหะจากดินไปยังพืช จากการนำข้อมูลความเข้มข้นของตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) และสังกะสี (Zn) ในดินและส่วนต่างๆ ของถั่วเหลืองมาคำนวณการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากดินไปยังถั่วเหลือง พบว่าถั่วเหลืองมีการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากดินสู่ถั่วเหลืองมีค่ามากกว่า 1 สำหรับทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) และสังกะสี (Zn) ซึ่งถือว่ามีการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากดินไปสะสมในถั่วเหลืองมีปริมาณมาก ยกเว้นตะกั่ว (Pb) มีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งถือว่ามีการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากดินไปสะสมในถั่วเหลืองมีปริมาณน้อย (ตารางที่ 4.9) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถั่วเหลืองสามารถดูดแคดเมียมได้มากที่สุด รองลงมาคือ สังกะสี ทองแดง และตะกั่ว ตามลำดับ และยังสอดคล้องกับการสกัดลำดับขั้น (หัวข้อ 4.5) ที่พบว่าแคดเมียมอยู่ในรูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ง่ายเป็นส่วนใหญ่ จึงทำให้ถั่วเหลืองสามารถดูดแคดเมียมได้มากกว่าโลหะหนักชนิดอื่น สำหรับสังกะสี ทองแดง ตะกั่ว ส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ซึ่งสามารถเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ยาก อาจมีผลที่ทำให้ถั่วเหลืองสามารถดูดโลหะเหล่านี้ได้น้อยลง โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhuang *et al.*, 2013 ที่ทำการปลูกถั่วเหลืองในดินปนเปื้อนโลหะหนักและให้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.9 การเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากดินสู่ถั่วเหลืองที่ปลูกในดินฉะเชิงเทราผสมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ (Mean ± S.D.)

ชุดการทดลอง	Pb	Cu	Cd	Zn
C	0.53 ± 0.40	2.14 ± 0.00	8.37 ± 0.47	3.69 ± 0.10
DX	0.51 ± 0.02	1.33 ± 0.01	6.58 ± 0.89	1.80 ± 0.08
DY	0.42 ± 0.08	1.39 ± 0.01	3.10 ± 0.42	1.40 ± 0.02
DZ	0.34 ± 0.03	1.27 ± 0.00	2.70 ± 0.23	1.83 ± 0.02
EX	0.40 ± 0.04	1.34 ± 0.00	3.54 ± 0.53	2.45 ± 0.37
EY	0.34 ± 0.02	1.28 ± 0.00	5.71 ± 2.15	1.95 ± 0.03
EZ	0.38 ± 0.02	1.88 ± 0.02	5.93 ± 0.76	1.54 ± 0.05
FX	0.38 ± 0.02	1.36 ± 0.00	2.61 ± 0.20	2.02 ± 0.05
FY	0.37 ± 0.01	1.45 ± 0.01	5.56 ± 0.21	1.42 ± 0.02
FZ	0.28 ± 0.01	1.74 ± 0.01	2.84 ± 0.12	1.65 ± 0.03
GX	0.40 ± 0.05	1.29 ± 0.01	6.09 ± 1.14	2.16 ± 0.12
GY	0.30 ± 0.07	1.31 ± 0.01	3.12 ± 0.37	2.14 ± 0.05
GZ	0.26 ± 0.04	1.50 ± 0.05	4.17 ± 0.44	1.93 ± 0.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

ในการศึกษาต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์จะคำนึงถึงปัจจัยหลักคือ ราคาของสารปรับปรุงดินชนิดเกรดการค้าเท่านั้น โดยจะคำนวณออกมาเป็นค่าใช้จ่ายต่อไร่ จากการทดลองที่ผ่านมา อัตราส่วนหินปูน:ซีพิโอไลท์ ที่เหมาะสม มี 2 อัตราส่วน คือ อัตราส่วน 1:1 ปริมาณที่เติมลงในดินที่เหมาะสมคือ 0.2% และอัตราส่วน 2:1 ปริมาณที่เติมลงในดินที่เหมาะสมคือ 0.4% ผลการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 4.10 จากตารางจะเห็นว่า สำหรับกรณีดินที่มีเฉพาะทองแดง แคดเมียม และสังกะสี ไม่มีตะกั่ว ต้นทุนจะอยู่ที่ 2,273.04 บาท และสำหรับกรณีดินที่มีเฉพาะตะกั่ว ทองแดง และแคดเมียม ไม่มีสังกะสี ต้นทุนจะอยู่ที่ 3,819.2 บาท ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าใช้จ่ายต่อไร่ไม่สูงมากนัก จึงมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์สำหรับอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เหมาะสม

อัตราส่วนสารปรับปรุงดิน		ปริมาณ (%)	ปริมาณสารปรับปรุงดินต่อ 1 ไร่ (กิโลกรัม)	ราคาสารปรับปรุงดินต่อ 1 กิโลกรัม (บาท)	ราคาสารปรับปรุงดินที่ต้องใช้ต่อ 1 ไร่ (บาท)
1:1	หินปูน	0.2	369.6	1.6	591.36
	ซีพิโอไลท์		369.6	4.55	1681.68
รวมค่าใช้จ่ายของการใช้สารปรับปรุงดิน (บาท)				**2273.04**	
2:1	หินปูน	0.4	985.6	1.6	1576.96
	ซีพิโอไลท์		492.8	4.55	2242.24
รวมค่าใช้จ่ายของการใช้สารปรับปรุงดิน (บาท)				**3819.2**	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 การประเมินสมดุลมวลของโลหะหนักในระบบ (Mass balance)

จากการศึกษาสมดุลมวลในระบบทั้งดินก่อนและหลังปลูกถั่วเหลือง รวมถึงในราก ลำต้น+ใบ และเมล็ด โดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ที่สูญหายจากระบบเพื่อประเมินการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด (ภาคผนวก ช) เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณโลหะหนักที่ใส่ลงไปพบว่า ค่าเฉลี่ยของทุกอัตราส่วนในตะกั่วมีเปอร์เซ็นต์ที่สูญหายไปจากระบบร้อยละ 8.37 ทองแดงร้อยละ 18.32 สังกะสีร้อยละ 5.49 แคดเมียมร้อยละ 6.39 โดยอาจเนื่องมาจากการรดน้ำแล้วอาจทำให้โลหะหนักกระเด็นออกมาจากอนุภาคดินบ้างเล็กน้อย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินพบว่าดินมีลักษณะเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย จัดว่าเป็นกรดเล็กน้อย ดินมีความหนาแน่น 1.54 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของดินค่อนข้างต่ำ ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) อยู่ในระดับสูง ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) ไม่สามารถตรวจวัดได้ (n.d.) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (avail. P) และปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (avail. K) ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างต่ำ จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดพบว่ามีปริมาณแคดเมียม สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง เท่ากับ 4.03, 45.44, 27.71 และ 6.96 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

5.1.2 เมื่อเติมสารปรับปรุงดินที่มีส่วนผสมของหินปูน:ซีพิโอไลท์ในอัตราส่วน 1:1 ลงไปในดิน 0.2% ผลผลิตเมล็ดถั่วเหลืองที่ได้มีน้ำหนักแห้งมากที่สุด จากการวัดความสูงต้นถั่วเหลือง พบว่าถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่เติมสารปรับปรุงดินในปริมาณ 0.8% โดยมีอัตราส่วนหินปูน:ซีพิโอไลท์ 2:1 และ 0:1 เมื่อเติมสารปรับปรุงดินที่มีส่วนผสมของหินปูน:ซีพิโอไลท์ที่อัตราส่วน 2:1 ลงไปในดิน 0.8 % ทำให้ถั่วเหลืองมีจำนวนฝักมากที่สุด

5.1.3 เมื่อในดินมีการปนเปื้อนตะกั่วในปริมาณต่ำและมีการปนเปื้อนทองแดง แคดเมียม สังกะสีในปริมาณสูง ควรเลือกเติมหินปูน:ซีพิโอไลท์ อัตราส่วน 1:1 โดยเติมลงดินเป็นปริมาณ 0.2% ซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณทองแดง แคดเมียม สังกะสี ให้ผ่านมาตรฐานอาหารได้ แต่ถ้าดินมีการปนเปื้อนตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม ในปริมาณสูง และมีการปนเปื้อนสังกะสีในปริมาณต่ำ ควรเลือกเติมหินปูน:ซีพิโอไลท์ อัตราส่วน 2:1 โดยเติมลงดินเป็นปริมาณ 0.4% ซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม ให้ผ่านมาตรฐานอาหารได้

5.1.4 เมื่อเติมสารปรับปรุงดินลงในดินทั้งก่อนและหลังการปลูกถั่วเหลือง รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของตะกั่ว ทองแดง สังกะสี คือรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (F4) แคดเมียมส่วนใหญ่พบในส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ (F2) สำหรับดินก่อนปลูกที่มีรูปฟอร์ม F1-F3 มากกว่าในดินหลังปลูก อาจเป็นเพราะพืชมีการดูดรูปฟอร์มเหล่านั้นไปมากแล้ว จึงทำให้ในดินหลังปลูกมีรูปฟอร์ม F4-F6 เพิ่มมากขึ้น ซึ่งรูปฟอร์มของดินก่อนปลูกมีความสอดคล้องกับปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถั่วเหลืองดูดไป

5.1.5 สังกะสีมีการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากรากสู่เมล็ดมากที่สุด รองลงมาคือ ทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว ตามลำดับ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าทองแดง แคดเมียม และตะกั่วมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่จากรากสู่เมล็ดในปริมาณต่ำ และถั่วเหลืองสามารถดูดแคดเมียมได้มากที่สุด รองลงมาคือ สังกะสี ทองแดง และตะกั่ว ตามลำดับ

5.1.6 จากการศึกษาความคุ้มทุนพบว่าค่าใช้จ่ายเมื่อเติมหินปูน:ซีพิโอไลท์ อัตราส่วน 1:1 ลงในดิน 0.2% และอัตราส่วน 2:1 ที่เติมลงในดิน 0.4% มีค่าใช้จ่ายรวมของการใช้สารปรับปรุงดินทั้งหมดต่อ 1 ไร่ เท่ากับ 2,273.04 บาท และ 3,819.2 บาท ตามลำดับ จะเห็นว่าการใช้สารปรับปรุงดินในการช่วยตรึงโลหะหนักในดินมีความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ และสามารถช่วยลดปริมาณการปนเปื้อนตะกั่ว ทองแดง แคดเมียม และสังกะสีได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาระยะเวลาที่สารปรับปรุงดินจะสามารถตรึงโลหะหนักในดินได้

5.2.2 ควรมีการศึกษาการเลือกใช้สารปรับปรุงดินชนิดอื่นๆ ที่อาจมีค่าใช้จ่ายต่อไร่ที่ถูกกว่านี้

5.2.3 ควรมีการนำไปศึกษาเพิ่มเติมในพื้นที่จริงเพื่อที่จะสามารถนำงานวิจัยนี้ไปปรับใช้ในการแก้ปัญหาพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักอื่นๆ ได้อย่างเหมาะสมยิ่งขึ้น

5.2.4 เมื่อนำไปปรับใช้กับดินชนิดอื่นอาจให้ผลที่แตกต่างกันบ้างขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีและกายภาพของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

กรมวิชาการเกษตร. 2548. **ระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในดินและค่าสูงสุดของโลหะหนักที่ยอมให้มีได้ในปุ๋ยอินทรีย์และกากตะกอนน้ำเสีย**. กรุงเทพฯ.

กรมวิชาการเกษตร. 2547. **เอกสารวิชาการถั่วเหลือง**. กรุงเทพฯ.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2556. **ดินของประเทศไทย**. กรุงเทพฯ.

กรองแก้ว ทิพยศักดิ์. 2553. ปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม2. กรุงเทพฯ. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

กองวิเคราะห์ดิน. กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. **คู่มือปฏิบัติการวิเคราะห์ดินของกลุ่มเคมีดิน 2**. กรมพัฒนาที่ดินกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร ม.เกษตร. 2548. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ

เชิดศักดิ์ อรรถอารุณ. 2544. การสำรวจและวิจัยคุณสมบัติของดินเบาลำปางเพื่องานด้านสิ่งแวดล้อม, รายงานวิชาการ ฉบับที่ กศ 7/2544. กองเศรษฐธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี : 50.

นันทีรา สรรมณี. 2541. **เคมีสิ่งแวดล้อม**. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ประกาศกระทรวงสาธารณสุข. ฉบับที่ 273. (2546). **เรื่อง มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน** .

ปิยะ ดวงพัตรา. 2553. **สารปรับปรุงดิน**. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์มหาลัยเกษตรศาสตร์.

มลิวรรณ บุญเสนอ. 2544. **พิษวิทยาสิ่งแวดล้อม**. นครปฐม. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.

รังสฤษดิ์ กาวีต๊ะ. 2541. พฤกษศาสตร์พืชเศรษฐกิจ. คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2540. **ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี**. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์ข้อมูลคณะกรรมการประสานงาน องค์กรพัฒนาเอกชนเพื่อสาธารณสุขมูลฐาน. 2535. เรื่อง ตะกั่วเป็นพิษ ศูนย์ข้อมูล คณะกรรมการประสานงาน องค์กรพัฒนาเอกชนเพื่อสาธารณสุขมูลฐาน กรุงเทพฯ.

สถาบันวิจัยพืชไร่. 2540. **การปลูกพืชไร่**. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.

สิทธิชัย ตันธนะสฤษดิ์. 2528. **พิษวิทยาสิ่งแวดล้อม.** โครงการวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สิทธิชัย อินทร์ปนาม. 2553. “รูปของโลหะหนักตามความเข้มข้นของโลหะหนักในดินที่สกัดด้วยวิธี sequential extraction” วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลับนเรศวร.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมพูล กฤตลักษณ์. ผลกระทบตะกั่วต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ จุลสารสภาวะแวดล้อม. (มกราคม – พฤษภาคม 2532) : 12-18.

โสภาพรรณ จิรนิรัติศัย. 2534. ปริมาณตะกั่วทองแดงแคดเมียมและสังกะสีในน้ำและดินตะกอนจากชั้นคุณภาพลุ่มน้ำต่างๆของลุ่มน้ำ แม่กอง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อภิชาต โพธิ์สุ. 2536. ปริมาณตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ในน้ำ และดินตะกอนจากชั้นคุณภาพลุ่มน้ำต่าง ๆ บริเวณลุ่มน้ำเลย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อัญชลี สุทธิประการ. 2534. แร่ในดิน. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์มหาลัยเกษตรศาสตร์.

Abad-Valle, P. Alvarez-Ayuso, E. A. Murciegob, E. and Pellitero, E. 2016. “Assessment of the use of sepiolite amendment to restore heavy metal polluted mine soil.” Geoderma. 280: 57–66.

Ayuso, A. E. Sanchez, G.A. 2003. “Sepiolite as a feasible soil additive for the immobilization of cadmium and zinc.” Sci Total Environ. Apr. 15: 305(1-3): 1-12.

Basta, N.T. and McGowen, S.L. 2004. “Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil.” Environ. Pollut. 127: 73–82.

Castaldi, P. Santona, L. and Melis, P. 2005. “Heavy metals immobilization by chemical amendments in a polluted soil and influence on white lupin growth.” Chemosphere. 60: 365–371.

Chang, Y.-T. Hsi, H.-C. Hseu, Z.-Y. and Jheng, S.-L. 2013. “Chemical stabilization of cadmiumin acidic soil using alkaline agronomic and industrial by-products.” J. Environ. Sci. Health Part A Environ. 48 (13): 1748–1756.

Damodaran, K. Shetty, B. Mohan, R. 2014. “Uptake of certain heavy metals from contaminated soil by mushroom-Galerina vittiformis.” Ecotoxicology and Environmental Safety. 104: 414-422.

Edgell, K. 1988. “USEPA Method Study 37-SW-846 Method 3050 Acid Digestion of Sediments Sludges, and Soils.” EPA Contract No. 68-03: 3254.

Eduardo, R.H. 2001. Molecular access to intracry stalline tunnels of sepiolite . J. Master. Chem. 11: 86-91.

Favas, P. J. C. Pratas, J. Gomes, M. E. P. and Cala, V. 2011. “Selective chemical extraction of heavy metals in tailings and soils contaminated by mining

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

activity: Environmental implications." Journal of Geochemical Exploration. 111: 160-171.

Friesl, W. Lombi, E. Horak, O. and Wenzel, W. W. 2003. "Immobilization of heavy metals in soils using inorganic amendments in a greenhouse study. J. Plant Nutr. Soil Sci. 166: 191-196.

Garau, G. Castaldi, P. Santona, L. Deiana, P. and Melis, P. 2007. "Influence of red mud, zeolite and lime on heavy metal immobilization, culturable heterotrophic microbial populations and enzyme activities in a contaminated soil." *Geoderma*. 142: 47–57.

Gray, C.W. Dunham, S. J. Dennis, P. G. Zhao, F. J. and McGrath, S. P. 2006. "Field evaluation of in situ remediation of a heavy metal contaminated soil using lime and red-mud." *Environ Pollut.* 142: 530–539.

Hang, Z. Xin, Z. Min, Z. Bo, H.L. Li, L. Wen-Tao, Y. Yan-Ming, W. Qiong-Yao, Q. and Ying-Jie W. 2014. "Effects of combined amendments on heavy metal accumulation in rice (Oryza sativa L.) planted on contaminated paddy soil." Ecotoxicology and Environmental Safety. 101: 226–232.

Janos, P. Vavrova, J. Herzogova, L. and Pilalova, V. 2010. "Effect s of inorganic and organic amendments on the mobility (leachability) of heavy metals in contaminated soil: a sequential extraction study." Geoderma. 159: 335–341.

Komarek, M. Vanek, A. and Ettler, V. 2013. "Chemical stabilization of metals and arsenic in contaminated soils using oxides – A review." Environ. Pollut. 172: 9–22.

Lee, S.H. Lee, J.S. Choi, Y.J. and Kim, J. G. 2009. "In situ stabilization of cadmium, lead, and zinc contaminated soil using various amendments." Chemosphere. 77: 1069–1075.

Liang, X. Han, J. Xu, Y. Sun, Y. Wang, L. Tan, X. 2014. "In situ field-scale remediation of Cd polluted paddy soil using sepiolite and palygorskite." Geoderma. 235-236: 9–18.

Liang X, Han J, Xu Y, Tan S, Lei Y, and Luo W. 2015. "In-situ remediation of Cd polluted paddy soil using sepiolite and combined amendments." Chin J Environ Eng. 9: 4571–4577.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Liang, X.F. Xu, Y.M. Wang, L. Su, G.H. Qin, X. and Sun, Y. 2011. "In-situ immobilization of cadmium and lead in a contaminated agricultural fields by adding natural clays combined with phosphate fertilizer." Acta Scie. Circumstantiae. 31: 1011-1018.

Lukowski, A. and Wiater, J. 2009. "The influence of mineral fertilization on heavy metal fraction contents in soil Part II: Copper and Nickel." Pol. J. Environ. Stud. 18: (4) 645.

Nan, Z. Chen, X. Yang, Q. Wang, X. Shi, Z. and Hou, W. 2008. "Structure transition from aragonite to vaterite and calcite by assistance of SDBS." J. Colloid Interface Sci. 325: 331-336.

Padilla-Ortega, E. Leyva-Ramos, R. and Flores-Cano, J. V. 2013. "Binary adsorption of heavy metals from aqueous solution ontonatural clays." Chem Eng J. 225: 535–546.

Park, J. H. Lamb, D. Paneerselvam, P. Choppala, G. Bolan, N. and Chung, J.W. 2011. "Role of organic amendments on enhanced bio remediation of heavy metal (loid) contaminated soils." J. Hazard Mater. 185: 549–574.

Sager, M. Park, J.H. and Chon, T.H. 2007. "The effect of soil bacteria and perlite on plant growth and soil properties in metal contaminated samples." Water Air Soil Poollut. 179: 265-281.

Shaheen, S. M. and Rinklebe, J. 2014. "Geochemical fractions of chromium copper and zinc and their vertical distribution in soil profiles along the Central Elbe River Germany." Geoderma. 228-229: 142-159.

Shi, W.S., Liu, C.G., Ding, D.H., Lei, Z.F., Yang, Y.N., Feng, C.P. and Zhang, Z.Y. 2013. Immobilization of heavy metals insewage sludge byusing subcritical water technology. Bioresour. Technol. 137: 18-24.

Sudapa, B. and Bhattacharyya, A. K. 2008. "Heavy metal accumulation in wheat in wheat plant grown in soil amended with industrial sludge." Chemosphere. 70: 1264-1272.

Sun, Y. Sun, G. Xu, Y. Wang, L. Liang, X. and Lin, D. 2013. "Assessment of sepiolite for immobilization of cadmium contaminated soils." Geoderma. 193: 149–155.

Sun, Y. B. Sun, G. H. Xu, Y. M. Wang, L. Lin, D. S. Liang, X. F. and Shi, X. 2012. "In situ stabilization remediation of cadmium contaminated soils of wastewater irrigation region using sepiolite." J. Environ. Sci. 24 (10): 1799-1805.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Suthar, V., Mahmood-ul-Hassan, M., Memon, K.S. and Rafique, E. 2013. Heavy-metal phytoextraction potential of spinach and mustard grown in contaminated calcareous soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 44 (18): 2757–2770.

Tessier, A. Campbell, P.G. and Bisson, M. 1979. "Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals." Anal. Chem. 51(7): 844–851.

Wang, C. Sheng, Y. Bala, H. Zhao, X. Zhao, J. Ma, X. and Wang, Z. 2007. "A novel aqueous-phase route to synthesize hydrophobic $CaCO_3$ particles in situ." Mater. Sci. Eng. C. 27: 42-45.

Wang, s. Jia, Y. and Wang, H. 2010. "Fraction of heavy metals in shallow marine sediments form Jinzhou Bay." China. J Environ Sci (Chaina). 22: 23-3.

Wu, Y. J. Hang, Z. Zi-Jin, Z. Wei Zhu, Z. Wen-Tao, Y. Pei-Qin, P. Min, Z. and Bo-Han, L. 2016. "A three-year insitu study on the persistence of acombined amendment (limestone and sepiolite) for remedying paddy soil polluted with heavy metals." Ecotoxicology and Environmental Safety. 130: 163–170.

Yang, H.F. Wang, Y.B. and Huang, Y.J. 2015. "Chemical fractions and phytoavailability of copper to rape grown in the polluted paddy soil." Int. J. Environ. Sci. Technol. 12: 1–10.

Yi, X. Xuefeng, L. Yingming, X. Xu, Q. Qingqing, H. Lin, W. and Yuebing, S. 2017. "Remediation of heavy metal polluted agricultural soils using clay minerals: A review." Pedosphere. 27(2): 193-207.

Yuebing, S. Guohong, S. Yingming, X. Weitao, L. Xuefeng, L. and Lin, W. 2016. "Evaluation of the effectiveness of sepiolite, bentonite, and phosphate amendments on the stabilization remediation of cadmium contaminated soils." Journal of Environmental Management. 166: 204-210.

Zeng, H. Xu, C. Zhou, H. and Liao, B.H. 2012. "Effects of mixed curing agents on the remediation of soils with heavy metal pollution." Environ Chem. 31:1368–1374.

Zhou, H. Zeng, M. Zhou, X. Liao, B. H. Liu, J. Lei, M. Zhoung, Q. Y. and Zeng, H. 2013. "Assessment of heavy metal contamination and bioaccumulation in soybean plants from mining and smelting areas of southern Hunan Province China." Environmental Toxicology and Chemistry.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zhou, H. Zhou, X. Zeng, M. Liao, B. H. Liu, L. Yang, W. T. Wu, Y. M. Qiu, Q. Y. Wang, Y. J. 2014. "Effects of combined amendments on heavy metal accumulation in rice (Oryza sativa L.) planted on contaminated paddy soil." Ecotoxicol. Environ. Saf. 101: 226–232.

Zhuang, P. Li, Z. A. Zou, B. Xia, H. P. and W, G. 2013. "Heavy metal contamination in soil and soybean near the Dabaoshan Mine, South China." Pedosphere. 23(3): 298-304.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์ดินและพืช

ก.1 การเก็บตัวอย่างดิน และกากตะกอนน้ำเสีย (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. ใช้เสียมขุดดินตามจุดที่กำหนดไว้ แล้วนำใส่กระสอบ จนครบทุกจุด
2. เทดินกองบนแผ่นผ้าใบและคลุกเค้าให้เข้ากัน จะได้ตัวอย่างดินรวม ใช้เป็นตัวแทนของดินทั้งแปลง

ก.2 การเตรียมตัวอย่างดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. นำตัวอย่างดินมาผึ่งลมจนแห้ง
2. บดดินโดยใช้ครกบดดิน แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร
3. เก็บแยกไว้ในถุงพลาสติกเพื่อนำมาวิเคราะห์ต่อไป

ก.3 การวัดความเป็นกรดด่างในดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

วิธีการ

การวัด pH ในน้ำ อัตราส่วน ดิน : น้ำ = 1:1 (w/w) ชั่งดิน 20 กรัม ใส่ในบีกเกอร์พลาสติก. เติมน้ำกลั่น 20 มล. คนให้เข้ากันด้วยแท่งแก้วเป็นระยะ ๆ ให้บ่อยครั้งในระยะ 30 นาทีแรก หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้อีก 30 นาที จึงวัด pH ของดินในส่วนที่เป็นน้ำใสด้วย pH meter หรือใช้ช้อนตวงตักดินและตวงน้ำแทนการชั่งดิน (1:1, v/v) เพื่อวัด pH ก็ได้

ก.4 การหาขนาดของอนุภาคดิน (Particle size analysis) (กรองแก้ว, 2553)

1. การปรับไฮโดรมิเตอร์

1.1 เทสารละลายคัลกอน จำนวน 100 ml ลงในกระบอกตวง ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 L ผสมให้ทั่วด้วยแท่งแก้วคนแบบ plunger ตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่

1.2 ค่อยๆหย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในสารละลายอย่างระมัดระวัง อ่านค่าจากสเกลที่รอยเว้าบนของเหลวที่ล้อมรอบไฮโดรมิเตอร์

2. การอ่านค่าจากสารละลายแขวนลอย

2.1 ชั่งดินที่ผึ่งและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 mesh แล้ว 40 g (ถ้าเป็นดินทรายร่วนหรือทรายใช้ 100 g) ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 ml เติมสารละลายคัลกอน 100 ml และน้ำกลั่นประมาณ 300 ml ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน

2.2 นำสารแขวนลอยดินที่เตรียมไว้ มากวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กประมาณ 5 นาที แล้วเทลงกระบอกตวงขนาด 1 L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ปรับปริมาตรสารในข้อ 2.3 ด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 L ทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่

2.4 จุ่มแท่งแก้วคนแบบ plunger แบบขึ้น-ลง เบาๆ เพื่อให้เกิดการผสมกันอย่างทั่วถึงทั้งกระบอกตวง

2.5 บันทึกเวลาเมื่อคนเสร็จ ถ้าที่ผิวของสารแขวนลอยมีฟอง เติมเอมิลอัลกอฮอล์ 1 หยด

2.6 ค่อยๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงอย่างระมัดระวังลงในสารแขวนลอย และอ่านสเกลเหมือนเดิม

2.7 เมื่อเวลาผ่านไป 40 วินาที หลังจากการกวนผสมค่าที่อ่านได้ต้องหักลบจากค่าที่อ่านได้จากการปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์

2.8 ค่อยๆ ดึงไฮโดรมิเตอร์ขึ้นอย่างระมัดระวังเมื่ออ่านเสร็จ ล้างและเช็ดให้แห้ง

2.9 เมื่อครบ 2 ชั่วโมง ให้อ่านค่าไฮโดรมิเตอร์อีกครั้งโดยทำเหมือนเดิม

<u>การคำนวณ</u>

$$\% \text{ sand} = \left(\frac{W-R_{40s}}{W}\right)\times 100$$

$$\% \text{ clay} = \left(\frac{R_{2hr}}{W}\right)\times 100$$

$$\% \text{ silt} = 100-(\%\text{sand} + \%\text{clay})$$

ก.5 การเตรียมตัวอย่างดินวิเคราะห์ X-ray Fluorescence (XRF)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 0.5 g และชั่งกรดบอริก 4.5 g บันทึกน้ำหนักรวมทั้งหมด
2. ผสมตัวอย่างกับกรดบอริกเข้าด้วยกัน โดยใช้เครื่องผสมของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์
3. นำตัวอย่างอัดเม็ด และส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สจล.

ก.6 การวิเคราะห์ความชื้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

1. ชั่งบีกเกอร์ขนาด 250 ml
2. นำตัวอย่างดินมาชั่ง 50 g (บันทึกน้ำหนักเปียก) ใส่บีกเกอร์
3. นำไปอบที่ 105-110 $^{\circ}$C เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งได้น้ำหนักดินคงที่ ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์
4. นำมาชั่งน้ำหนักแห้ง
5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

<u>การคำนวณ</u>

$$\text{ความชื้น } \% = \frac{(\text{น้ำหนักดินก่อนอบ-น้ำหนักดินหลังอบ})}{\text{น้ำหนักดินก่อนอบ}}\times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.7 การวิเคราะห์อินทรียวัตถุของดิน (Walkley Black modified acid-dichromate digestion, $FeSO_4$ titration method) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

วิธีทำ

1. ชั่งดิน 1 กรัม ใส่ขวดชมพู่ ขนาด 250 มล. (ปริมาณตัวอย่างดินอาจลดลงได้ตามความเหมาะสมถ้าดินนั้นมีปริมาณอินทรียวัตถุสูง สังเกตได้จากสีของดิน ถ้าเป็นดินสีดำหรือ สีน้ำตาลเข้มต้องชั่งดินให้ลดลง แต่ถ้ากรณีเป็นดินทรายก็ต้องเพิ่มปริมาณดินให้มากขึ้นกว่าเดิม)
2. เติม สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 1.0 N 10 มล. โดยใช้ Dispenser
3. เติม H_2SO_4 เข้มข้น 20 มล. โดยใช้ Dispenser พยายามให้กรดไหลลงข้าง ๆ ขวดให้ชะล้างตัวอย่างลงไปอยู่ในขวดให้หมด เพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดดินเกาะติดอยู่ตามข้างขวด เขย่าเบาๆ ให้ตัวอย่างเข้ากันดีเป็นเวลาประมาณ 1 นาที
4. ตั้งทิ้งไว้จนสารละลายเย็นเท่าอุณหภูมิห้อง
5. เติมน้ำกลั่น 50 มล. แล้วทิ้งไว้ให้เย็น
6. หยดอินดิเคเตอร์ออร์โทฟีแนนโทรลีน 5 หยด
7. ไตเตรทด้วยสารละลาย FAS 0.5 N ที่จุด end poit สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง
8. ทำ Blank โดยเริ่มทำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ถึง ขั้นตอนที่ 6

วิธีคำนวณ

$$\% \text{ อินทรียวัตถุ (Organic Matter, O.M.)} = \frac{10 \times (B-S) \times 100 \times 100 \times 3 \times 100 \times N}{B \times 77 \times 58 \times 1000 \times W}$$

B = ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไตเตรท Blank (มล.)

S = ปริมาณ FAS ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง (มล.)

W = น้ำหนักดินที่ใช้ (กรัม)

N = ความเข้มข้นของ $K_2Cr_2O_7$ (ในกรณีที่ความเข้มข้นไม่ใช่ 1.0 N) (หน่วย normality)

ก.8 ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดินโดยวิธี Bray II (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

วิธีทำ

1. ชั่งตัวอย่างดิน 1.0 กรัม ใส่ในขวดแก้วก้นแบน (Erlenmeyer flask) ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำยาสกัด Bray II 10 มิลลิลิตร เขย่า 1 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง No.5 ขนาด 11.0 ซม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปิเปตสารละลายที่สกัดได้ในข้อ (2) อัตราส่วน 1 ส่วนต่อ working solution 16 ส่วน (เท่ากับ 17 เท่า โดยใช้ Auto-dilutor) ลงในหลอดแก้ว ทิ้งไว้ครึ่งชั่วโมง นำไปอ่านค่าความเข้มข้น (concentration) ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ช่วงคลื่น 882 นาโนเมตร
4. ทำ blank และชุดของสารละลายมาตรฐาน (standard set) เช่นเดียวกับข้อ (3)

คำนวณ

ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช $(P) = \frac{B \times DF(sample) \times X}{A \times DF(standard)}$ มก./กก.

ดังนั้น ถ้าไม่มีการทำเจือจาง $(P) = \frac{B \times X}{A}$ มก./กก.

เมื่อ

A = น้ำหนักของตัวอย่างดิน (กรัม)

B = น้ำยาสกัด (มิลลิลิตร)

X = ค่าที่อ่านได้ เมื่อวัดค่าเทียบกับ standard set

DF = อัตราส่วนการเจือจาง (dilution factor)

ก.9 การวิเคราะห์โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Available Potassium) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

วิธีทำ

1. ชั่งดิน 2.5 กรัม ใส่ในขวดชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 50 มล.
2. เติม 1 M NH_4OAc pH 7.0 25 มล. เขย่าด้วยเครื่องเขย่า 30 นาที
3. กรองดิน และเก็บสารละลายที่กรองได้
4. วิเคราะห์ปริมาณ K ด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer โดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน

คำนวณ

โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดิน, mg kg^{-1} = 10 K x df

K = ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือ, mg kg^{-1}

df = dilution factor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.10 การวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน (Cation Exchange Capacity, C.E.C.) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

(Ammonium saturation method)

วิธีทำ

1. ชั่งดิน 5 กรัม ใส่ใน ขวดชมพู่ ขนาด 125 มล. เติม 1 M pH 7.0 NH_4OAc 50 มล. เขย่าให้เข้ากันดี ทิ้งไว้ค้างคืน
2. นำมากรองโดยใช้กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel) ต่อเข้ากับขวดกรอง ใช้กระดาษกรอง Whatman No. 5 จำนวน 1 แผ่น (หรือใช้ No. 42 จำนวน 1 แผ่น หรือ No. 1 จำนวน 2 แผ่น แทนกันได้) ล้างตัวอย่างดินด้วย 1 M NH_4OAc pH 7.0 ทีละน้อย หลาย ๆ ครั้ง จนได้ปริมาตรเกือบ 100 มล. นำสารละลายที่กรองได้นี้ถ่ายใส่ Volumetric flask แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มล. เก็บไว้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณ exchangeable cations Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+} และ K^{+} ต่อไป
3. ล้างตัวอย่างดินในกรวยบุชเนอร์ ในข้อ.2 ต่อด้วย 1 M NH_4OAc pH 7.0 อีก 5 ครั้ง ๆ ละประมาณ 20 มล.
4. ล้างตัวอย่างดินต่อด้วย 1 M NH_4Cl pH 7.0 5 ครั้ง ๆ ละ ประมาณ 20 มล.
5. ล้างตัวอย่างดินต่อด้วย 0.25 M NH_4Cl pH 7.0 ประมาณ 20 มล. 1 ครั้ง
6. ล้างด้วย ethyl alcohol 95 % อีก 5 - 6 ครั้ง ๆ ประมาณ 20 มล. ทุกครั้งที่ล้างใช้กระบอกฉีด ฉีดล้างตัวอย่างดินที่อาจติดค้างอยู่ที่ปาก buchner funnel ให้ลงไปรวมอยู่ในกรวยให้หมด สารละลายที่ได้จากข้อ 2-5 เททิ้งไป (การล้างด้วย alcohol เพื่อล้างแอมโมเนียมส่วนเกินที่ดินไม่ได้แลกเปลี่ยนออกให้หมด ซึ่งทดสอบได้จากปริมาณคลอไรด์ไม่มีหลงเหลืออยู่ในดินโดยหยดสารละลาย $AgNO_3$ 0.1 M 1 - 2 หยด ลงในสารละลายที่รองรับมาจาก buchner funnel โดยตรงยังไม่ได้หยดลงสู่ขวดกรอง ถ้ามีตะกอนสีขาวเกิดขึ้นแสดงว่ายังล้างแอมโมเนียมไม่หมด ต้องล้างตัวอย่างดินด้วย ethyl alcohol 95 % ต่อไปอีก แล้วทดสอบคลอไรด์ใหม่ดังที่กล่าวมาแล้ว จนไม่มีตะกอนสีขาวนั้นแสดงว่าล้างแอมโมเนียมหมดแล้ว)
7. เปลี่ยนขวดกรองใหม่สำหรับรองรับสารละลายใหม่ ล้างตัวอย่างดินที่ยังอยู่ในกรวยบุชเนอร์ในข้อ 5 ด้วย acidified NaCl 10 % แต่ละครั้งที่ล้างให้ใส่สารละลาย NaCl ให้ท่วมตัวอย่างดินจนกระทั่งได้สารลายที่กรองได้ (leachate) ประมาณ 300-350 มล.
8. ถ่ายได้สารลายที่กรองได้ใส่ในขวดกลั่น ล้างขวดกรองด้วยน้ำกลั่นและเทน้ำที่ล้างรวมลงไปในขวดกลั่น
9. นำขวดกลั่นไปกลั่น โดยเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 % ลงไปในขวดกลั่นให้มากเกินพอ (ประมาณ 30 มล.) โดยมีสารละลายกรดบอริก (H_3BO_3) 3% ประมาณ 30 มล. ใส่ในขวดชมพู่ขนาด 500 มล. คอยรองรับสารละลายที่กลั่นออกมาได้ และในสารละลายกรดบอริกนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใส่อินดิเคเตอร์ผสมประมาณ 5 หยด ใช้เวลากลั่น ประมาณ 40 - 45 นาที หรือจนกลั่นได้สารละลายประมาณ 250-275 มล.

10. นำสารละลายที่กลั่นได้ในขวดชมพู่ที่รองรับไปไตเตรทกับสารละลายกรดเกลือ 0.1 N จุดยุติคือสีของอินดิเคเตอร์ในสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดง บันทึกปริมาตรของกรดเกลือที่ใช้ไตเตรท แล้วนำมาคำนวณค่า CEC
11. นำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 10 % ที่ใช้ล้างดินมากลั่นเป็น Blank โดยทำเช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

<u>คำนวณ</u>

$$\text{CEC (cmolc/kg)} = \frac{\text{(T -B) x N x 100 x AD / OD}}{\text{Szmple wt. (gm)}}$$

T = ปริมาตรกรดเกลือที่ใช้ไตเตรทกับตัวอย่างดิน

B = ปริมาตรกรดเกลือที่ใช้ไตเตรทกับ Blank

N = ความเข้มข้นของกรดเกลือมีหน่วยเป็นนอร์มัลลิตี (normality)

AD / OD = อัตราส่วนน้ำหนักดินกับดินอบแห้ง (airdried / oven - dried ratio)

ก.11 การวัดค่าการนำไฟฟ้าของดิน Electrical Conductivity (EC) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

<u>การสกัดในอัตราส่วน ดิน : น้ำ = 1 : 5</u>

ชั่งดิน 4 กรัม ใส่ในหลอดทดลองขนาด 40 มล ใส่น้ำ 20 มล คนให้เข้ากันด้วยแท่งแก้วเป็นระยะ ๆ นาน ½ ชั่วโมง หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ ½ ชั่วโมง แล้วจึงนำไปอ่านค่า EC โดยเครื่อง Electrical Conductivity meter โดยใช้สารละลายมาตรฐาน KCl 0.01 M หรือ 0.1 M ปรับค่าคงที่ (cell constant) ของเครื่อง Electrical Conductivity meter ที่ 25 $^{\circ}$C จะมีค่า = 1.412 dS m^{-1} หรือ 12.88 dS m^{-1}

<u>คำนวณ</u>

ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายสูงขึ้นประมาณ 2% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส เครื่องมือวัดที่ไม่สามารถคำนวณแปลงค่าที่วัดได้เป็นค่าที่อุณหภูมิ ควรวัดอุณหภูมิสารละลายแล้วคำนวณเป็นค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตามสมการ

$$EC_{25} = ECt/[1 + 0.02(t - 25)]$$

เมื่อ EC_{25} = ค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

EC_t = ค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้ที่อุณหภูมิ t องศาเซลเซียส

t = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.12 การวิเคราะห์ไนโตรเจนในดินทั้งหมด (Total nitrogen) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 0.5-2.0 g ใส่ใน Micro Kjeldahl tube
2. เติมสารเร่งปฏิกิริยาประมาณ 1g และเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 ml
3. นำไปย่อยด้วยเตาย่อย (Digestion System) ในระยะแรกๆ ใช้ไฟอ่อนๆ แล้วเพิ่มไฟให้แรงขึ้น
4. Digest จนสีของของเหลวใน Kjeldahl flask เริ่มใส เคี่ยวต่อไปอีก 20-30 นาที จึงยกออกจากเตาแล้วปล่อยให้เย็น
5. รินน้ำกลั่นประมาณ 10 ml ลงไปรอบๆ ก้านหลอดของ Micro Kjeldahl flask เขย่าของผสมให้เข้ากัน ปล่อยไว้ให้เย็นอีกครั้ง แล้วเทใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 ml เขย่าของเหลวให้เข้ากัน ปล่อยทิ้งไว้จนดินตกตะกอน เพื่อนำของเหลวใสข้างบนไปกลั่น
6. เตรียม Blank ตามวิธีข้อ 2 -5 โดยไม่มีตัวอย่างดิน
7. เปิดเครื่องกลั่นและล้างเครื่องกลั่น 1 ครั้ง ด้วยการกลั่นน้ำกลั่น
8. นำตัวอย่างในข้อ 5 มาเข้าเครื่องกลั่น กำหนดให้เติมน้ำกลั่น 50 ml และ NaOH 40% 25 ml กลั่นประมาณ 4 นาที
9. เติมกรดบอริก 4% 25 ml ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 ml หยดอินดิเคเตอร์ผสมประมาณ 6-7 หยด สารละลายมีสีม่วงแดงนำไปรองรับการกลั่นจากข้อ 8 สารละลายนี้จะเปลี่ยนสีจากสีม่วงแดงเป็นสีเขียว และรองรับจนสารละลายในขวดรูปชมพู่ประมาณ 150 ml
10. ไทเทรตสารละลายที่ได้จากการกลั่นในข้อ 9 กับกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (HCl) 0.1 N จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วงแดง
11. กลั่น Blank และไทเทรต เช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

<u>คำนวณ</u>

$$\% \text{ T-N} = \frac{1.4 \times X\,(Y-B)}{A}$$

A = น้ำหนักตัวอย่างดิน (g)

B = มิลลิลิตรของ standard HCl ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง blank

Y = มิลลิลิตรของ standard HCl ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง

X = ความเข้มข้นของ HCl

1.4 = น้ำหนักสมมูลของไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.13 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดินและพืช (USEPA 3050B, 1988)

1. ชั่งตัวอย่างดินหรือพืช 1 g ใส่บีกเกอร์ขนาด 50 ml
2. เติม HNO_3 10 ml digest 15 นาที เติม HNO_3 5 ml digest 2 ชม. ที่อุณหภูมิ 80-100 °C จนควันสีน้ำตาลหมดไป
3. เติม H_2O 2 ml และ H_2O_2 10 ml digest 2 ชม.
4. เติม HCl 10 ml digest 15 นาที
5. นำไปกรองและปรับปริมาตร 100 ml
6. กรองอีกครั้งด้วย syringe filter 0.45 micron เก็บสารละลายไว้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic absorptions Spectrophotometer (AAS)

ก.14 การเตรียมตัวอย่างพืช (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1. ล้างต้นถั่วเหลืองด้วยน้ำกลั่น
2. อบที่อุณหภูมิ 70 ℃ จนน้ำหนักคงที่
3. ถั่วเหลืองจะแยกออกเป็น 3 ส่วน (ราก ต้นใบ และเมล็ด)
4. บดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เก็บในถุงพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

ก.15 วิธีการสกัดลำดับขั้น (Sequential extraction) (Tessier *et al.* 1997)

1. ชั่งดิน 1 g
2. ส่วนที่ละลายน้ำได้ เติม H_2O 15 ml เขย่า 2 ชม. ปั่นเหวี่ยง 3500 รอบ 20 นาที เก็บสารละลายส่วนใส และทำการล้างดิน ปรับปริมาตร 100 ml เก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป
3. ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ เติม 1 M $MgCl_2$ 20 ml เขย่า 2 ชม. ปั่นเหวี่ยง 3500 รอบ 20 นาที เก็บสารละลายส่วนใส และทำการล้างดิน ปรับปริมาตร 100 ml เก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป
4. ส่วนที่ตรึงกับคาร์บอเนต เติม 1 M NaOAc 20 ml เขย่า 5 ชม. ปั่นเหวี่ยง 3500 รอบ 20 นาที เก็บสารละลายส่วนใส และทำการล้างดิน ปรับปริมาตร 100 ml เก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป
5. ส่วนที่ตรึงกับออกไซด์ เติม 0.04 M $NH_2OH \cdot HCl$ 20 ml เขย่า 6 ชม. ปั่นเหวี่ยง 3500 รอบ 20 นาที เก็บสารละลายส่วนใส และทำการล้างดิน ปรับปริมาตร 100 ml เก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป
6. ส่วนที่ตรึงกับสารอินทรีย์ เติม 0.02 M HNO_3 7.5 ml เติม H_2O_2 10 ml digest 2 ชม. H_2O_2 10 ml digest 3 ชม. เติม 3.2 M NH_4OAc 12.5 ml เขย่า 30 นาที ปั่นเหวี่ยง 3500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบ 20 นาที เก็บสารละลายส่วนใส และทำการล้างดิน ปรับปริมาตร 100 ml เก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

7. ส่วนที่เหลือ เติม เติม 4.6 ml Conc. HNO_3 และเติม 14 ml Conc. HCl digest 2 ชม. ปั่นเหวี่ยง 3500 รอบ 20 นาที เก็บสารละลายส่วนใส และทำการล้างดิน ปรับปริมาตร 100 ml เก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป
8. กรองด้วย syringe filter 0.45 micron เก็บสารละลายไว้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic absorptions Spectrophotometer (AAS)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ชุดดิน ผลการวิเคราะห์ดินเบื้องต้น และความคุ้มทุน

ชุดดิน

กลุ่มชุดดินที่ 18 ลักษณะโดยทั่วไป: เนื้อดินบนเป็นดินร่วนปนทราย สีเทาปนน้ำตาลอ่อน สีน้ำตาลปนแดงอ่อน ดินล่างเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย สีเทาปนน้ำตาล สีเทาปนชมพู พบจุดประสีน้ำตาลแก่ สีแดงปนเหลืองปะปน เกิดจากพวกตะกอนลำน้ำพบบริเวณ พื้นที่ราบเรียบหรือค่อนข้างราบเรียบตามลานตะพักลำน้ำระดับต่ำ น้ำแช่ขังลึก 30 ซม. นานประมาณ 4 เดือน เป็นดินลึก มีการระบายน้ำค่อนข้างเลว มีความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติค่อนข้างต่ำ ดินชั้นบน pH 6.0-7.0 ส่วนดินชั้นล่าง pH ประมาณ 5.5-6.5 ได้แก่ชุดดินเขาย้อย ชลบุรี และโคกสำโรง ปัจจุบันบริเวณดังกล่าวส่วนใหญ่ใช้ทำนา บางแห่งใช้ปลูกอ้อย หรือปลูกพืชล้มลุกในฤดูแล้ง

ปัญหาในการใช้ประโยชน์ที่ดิน : เนื้อดินเป็นดินทรายหยาบ พืชมีโอกาสเสี่ยงต่อการขาดแคลนน้ำ ความอุดมสมบูรณ์ค่อนข้างต่ำ ฤดูฝนมีน้ำแช่ขังนาน 4 เดือน

ความเหมาะสมสำหรับการปลูกพืช : กลุ่มชุดดินที่ 18 พบบริเวณที่ราบต่ำ สภาพพื้นที่ราบเรียบถึงเกือบราบเรียบ ดินมีการระบายน้ำค่อนข้างเลวถึงเลว ในช่วงฤดูฝนมีน้ำขังนานระหว่าง 3-4 เดือน จึงมีศักยภาพเหมาะสมในการทำนามากกว่าการปลูกพืชไร่ พืชผักและไม้ผล ยกเว้นถ้าได้มีการปรับปรุงแก้ไขปัญหาน้ำขังและการระบายน้ำของดิน อย่างไรก็ตามในสภาพปัจจุบันสามารถปลูกพืชไร่และพืชผักอายุสั้นได้ ในช่วงฤดูแล้ง ถ้ามีน้ำชลประทานและแหล่งน้ำธรรมชาติเสริม

ตารางที่ ข-1 ขนาดอนุภาคดินของดินตัวอย่าง

อนุภาคดิน			ลักษณะเนื้อดิน
%sand	%silt	%Clay	Silty clay loam
13.42	48.33	38.25	

ตารางที่ ข-2 ค่าความชื้นของดินตัวอย่าง

เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
1	2	3		
10.43	11.55	13.26	11.74	1.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 ค่าความเป็นกรดด่างของดินตัวอย่าง

ค่าความเป็นกรดด่างของดินตัวอย่าง			ค่าเฉลี่ย	S.D.
1	2	3		
6.6	6.5	6.5	6.5	0.06

ตารางที่ ข-4 ค่าความหนาแน่นของดินตัวอย่าง

ค่าหนาแน่นรวมของดิน (กรัม/ลบ.ซม.)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
1	2	3		
1.5084	1.5088	1.6001	1.54	0.05

ตารางที่ ข-5 ค่าการนำไฟฟ้าของดินตัวอย่าง

ค่าการนำไฟฟ้า(ไมโครซีเมนต์/ซม.)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
1	2	3		
322	325	315	320	5.13

ตารางที่ ข-6 ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินตัวอย่าง

CEC (meq/100g)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
1	2	3		
5.44	6.51	5.89	5.94	0.53

ตารางที่ ข-7 ปริมาณของสารอินทรีย์ของดินตัวอย่าง

เปอร์เซ็นต์สารอินทรีย์ (%)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
1	2	3		
5.45	6.21	5.98	5.88	0.39

ตารางที่ ข-8 ปริมาณไนโตรเจนของดินตัวอย่าง

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (%)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
1	2	3		
n.d.	n.d.	n.d.	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-9 ปริมาณฟอสฟอรัสของดินตัวอย่าง

ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
1	2	3		
9.58	10.95	12.31	10.94	1.36

ตารางที่ ข-10 ปริมาณโพแทสเซียมของดินตัวอย่าง

ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
1	2	3		
29	29.225	32.41	29.54	2.63

ตารางที่ ข-11 ปริมาณโลหะหนักของดินตัวอย่าง

ชนิดโลหะหนัก	ความเข้มข้นโลหะหนัก (mg/kg)			ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3		
ตะกั่ว	28.4772	27.0837	27.5752	27.71	0.71
ทองแดง	5.8953	7.4955	7.4933	6.96	0.92
แคดเมียม	3.9968	3.6978	4.396	4.03	0.35
สังกะสี	43.5651	48.1711	44.5869	45.44	2.42

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์

$d = \frac{m}{v}$ (v = 1 ม. × 1 ม. × 0.15 ม. ; d = 1.54 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

ดังนั้น m = 231000 กรัม (231 กิโลกรัม)

1 ไร่ (1600 ตารางเมตร) = ดิน 369600 กิโลกรัม

หินปูน:ซีพิโอไลท์ อัตราส่วน 1:1 ปริมาณ 0.2 %
ดิน 0.1 กิโลกรัม ใส่สารปรับปรุง 0.2 กรัม
ดิน 369600 กิโลกรัม ต้องใส่สารปรับปรุงทั้งหมด 739.2 กิโลกรัม
ดังนั้น ต้องใส่หินปูน 369.6 กิโลกรัม และซีพิโอไลท์ 369.6 กิโลกรัม
หินปูนกิโลกรัมละ 1.6 บาท คิดเป็นเงิน 591.36 บาท ซีพิโอไลท์กิโลกรัมละ 4.55 คิดเป็นเงิน 1681.68 บาท

หินปูน:ซีพิโอไลท์ อัตราส่วน 2:1 ปริมาณ 0.4 %
ดิน 0.1 กิโลกรัม ใส่สารปรับปรุง 0.4 กรัม
ดิน 369600 กิโลกรัม ต้องใส่สารปรับปรุงทั้งหมด 1478.4 กิโลกรัม
ดังนั้น ต้องใส่หินปูน 985.6 กิโลกรัม และซีพิโอไลท์ 492.8 กิโลกรัม
หินปูนกิโลกรัมละ 1.6 บาท คิดเป็นเงิน 1576.96 บาท ซีพิโอไลท์กิโลกรัมละ 4.55 คิดเป็นเงิน 2242.24 บาท

หมายเหตุ: ราคาหินปูนจากบริษัทลักส์ไลม์ ณ วันที่ 15 มกราคม 2561
ราคาซีพิโอไลท์จาก www.Alibaba.com นำเข้าจากประเทศจีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ ค-1 ความสูงของต้นถั่วเหลือง

ตัวอย่าง	อายุถั่วเหลือง (วัน)											
	20	**27**	**34**	**41**	**48**	**55**	**62**	**71**	**78**	**85**	**92**	**99**
c1	17	21	29	38	38	38	38	38	38	38	38	38
c2	15	20	30	39	42	42	42	42	42	42	42	42
c3	15	20	28	37	37	37	37	37	38	38	38	38
DX1	15	20	30	37	41	41	41	41	41	41	41	41
DX2	15	20	28	41	46	46	43	44	44	44	44	44
DX3	15	21	28	39	44	44	44	44	44	44	44	44
DY1	16	21	28	38	39	40	40	40	40	40	40	40
DY2	15	20	31	44	44	44	44	44	44	44	44	44
DY3	15	21	33	46	46	46	46	46	46	46	46	46
DZ1	17	22	29	38	40	40	40	40	40	40	40	40
DZ2	15	20	30	39	42	42	42	42	42	42	42	42
DZ3	15	19	30	40	41	41	41	41	41	41	41	41
EX1	16	19	30	44	44	44	44	44	44	44	44	44
EX2	15	20	26	36	42	42	42	42	42	42	42	42
EX3	17	20	28	39	42	42	43	43	43	43	43	43
EY1	18	21	32	44	45	46	46	46	46	46	46	46
EY2	15	19	29	39	45	45	45	46	46	46	46	46
EY3	15	19	29	40	42	42	42	42	42	42	42	42
EZ1	17	20	30	41	42	43	43	43	43	43	43	43

ตารางที่ ค-1 ความสูงของต้นถั่วเหลือง (ต่อ)

ตัวอย่าง	**อายุถั่วเหลือง (วัน)**											
	20	**27**	**34**	**41**	**48**	**55**	**62**	**71**	**78**	**85**	**92**	**99**
EZ2	17	26	36	49	55	55	55	55	55	55	55	55
EZ3	17	23	36	50	57	59	60	60	60	60	60	60
FX1	16	20	30	41	42	43	43	43	43	43	43	43
FX2	16	20	32	44	45	45	45	45	45	45	45	45
FX3	17	21	33	40	44	44	44	44	44	44	44	44
FY1	15	19	27	35	39	40	40	40	40	40	40	40
FY2	17	21	30	38	42	42	42	42	42	42	42	42
FY3	16	20	30	35	37	38	39	39	39	39	39	39
FZ1	15	19	28	42	44	45	45	45	45	45	45	45
FZ2	15	20	30	40	43	43	43	43	43	43	43	43
FZ3	17	21	33	40	42	42	42	42	42	42	42	42
GX1	15	19	29	40	41	41	42	42	42	42	42	42
GX2	15	20	31	44	45	45	46	46	46	46	46	46
GX3	16	20	31	42	43	43	43	43	45	45	45	45
GY1	18	21	35	44	45	46	46	46	46	46	46	46
GY2	18	22	39	45	46	47	47	47	47	47	47	47
GY3	17	20	28	39	42	43	44	45	45	45	45	45
GZ1	15	19	36	48	52	53	54	54	54	54	54	54
GZ2	17	21	37	55	55	55	55	55	55	55	55	55
GZ3	17	21	33	49	50	51	51	51	51	51	51	51

ตารางที่ ค-2 จำนวนฝักของต้นถั่วเหลือง

ตัวอย่าง	อายุถั่วเหลือง (วัน)										
	20	27	34	41	48	55	62	71	78	85	92	99
c1	-	-	-	2	4	7	9	12	13	14	14	14
c2	-	-	-	1	5	6	8	10	12	14	14	14
c3	-	-	-	4	7	9	12	14	15	16	16	16
DX1	-	-	-	1	2	4	5	7	9	12	12	12
DX2	-	-	-	-	1	3	5	8	10	12	13	15
DX3	-	-	-	4	7	10	14	15	16	16	16	16
DY1	-	-	-	2	3	4	6	8	10	12	12	12
DY2	-	-	-	3	4	5	6	8	10	10	10	10
DY3	-	-	1	3	7	10	12	14	15	15	15	15
DZ1	-	-	-	2	4	5	8	10	12	14	14	14
DZ2	-	-	-	3	7	9	10	12	14	15	15	15
DZ3	-	-	1	4	7	10	12	14	15	15	15	15
EX1	-	-	-	-	2	3	3	5	7	10	11	12
EX2	-	-	-	4	9	12	14	17	17	17	17	17
EX3	-	-	-	2	4	6	8	10	12	12	12	12
EY1	-	-	1	4	5	7	8	12	14	14	14	14
EY2	-	-	-	2	4	6	7	10	12	12	13	13
EY3	-	-	-	4	6	10	11	13	15	16	16	16
EZ1	-	-	1	7	12	18	20	22	22	22	22	22

ตารางที่ ค-2 จำนวนฝักของถั่วเหลือง (ต่อ)

ตัวอย่าง	อายุถั่วเหลือง (วัน)											
	20	**27**	**34**	**41**	**48**	**55**	**62**	**71**	**78**	**85**	**92**	**99**
EZ2	-	-	-	4	6	11	13	15	16	17	18	18
EZ3	-	-	-	8	15	19	21	21	21	21	21	21
FX1	-	-	-	4	8	10	13	15	16	18	18	18
FX2	-	-	-	2	8	11	14	16	17	17	17	17
FX3	-	-	-	8	15	20	24	26	26	26	26	26
FY1	-	-	-	3	5	7	8	10	13	14	14	14
FY2	-	-	-	2	4	6	8	10	13	14	14	14
FY3	-	-	-	3	4	6	7	10	13	15	15	15
FZ1	-	-	-	2	5	8	9	12	14	15	15	15
FZ2	-	-	-	3	5	6	8	12	13	14	14	14
FZ3	-	-	-	4	9	13	15	17	18	19	19	19
GX1	-	-	-	2	4	5	8	12	14	15	15	15
GX2	-	-	1	4	7	9	10	13	15	17	17	17
GX3	-	-	-	3	5	8	11	14	15	16	17	17
GY1	-	-	-	2	4	8	11	15	15	15	15	15
GY2	-	-	-	3	8	11	12	14	15	16	16	16
GY3	-	-	-	3	5	8	9	13	14	14	15	15
GZ1	-	-	3	8	12	16	16	19	19	19	19	19
GZ2	-	-	2	8	15	15	16	19	22	22	22	22
GZ3	-	-	-	4	8	12	15	18	19	19	19	19

ตารางที่ ค-3 น้ำหนักเมล็ดแห้ง

ตัวอย่าง	น้ำหนักเมล็ด (กรัม/กระถาง)	เฉลี่ย
c1	7.34	6.39
c2	6.15	
c3	5.69	
DX1	7.57	7.91
DX2	8.32	
DX3	7.85	
DY1	7.12	7.59
DY2	8.96	
DY3	6.7	
DZ1	7.74	8.47
DZ2	8.56	
DZ3	9.12	
EX1	6.21	7.25
EX2	7.56	
EX3	7.99	
EY1	7.75	8.03
EY2	8.21	
EY3	8.12	
EZ1	15.23	14.59
EZ2	10.32	
EZ3	18.21	
FX1	20.21	21.32
FX2	25.24	
FX3	18.5	
FY1	12.48	12.91
FY2	15.22	
FY3	11.03	
FZ1	18.27	17.01
FZ2	15.01	
FZ3	17.74	
GX1	7.02	8.41
GX2	9.63	
GX3	8.57	
GY1	7.15	9.18
GY2	9.13	
GY3	11.25	
GZ1	10.55	13.65
GZ2	14.28	
GZ3	16.11	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ผลการทดลองโลหะหนักในดินและพืช

ตารางที่ ง-1 ผลตะกั่วในถั่วเหลือง

ตัวอย่าง	Pb ในราก (mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Pb ในต้น+ใบ (mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Pb ในเมล็ด (mg/kg)	เฉลี่ย	SD
c1	65.33	65.37	2.15	6.76	8.53	1.83	10.29	9.55	1.06
c2	63.25			8.38			10.03		
c3	67.54			10.43			8.33		
DX1	59.32	57.90	2.02	7.15	7.52	0.55	3.20	4.5597	1.20
DX2	56.47			8.16			5.49		
DX3	83.15			7.26			4.98		
DY1	54.32	55.33	3.58	1.65	1.27	1.53	1.99*	4.68	1.70
DY2	59.31			2.58			3.97		
DY3	52.36			nd			5.39		
DZ1	55.34	54.33	1.44	1.94	3.36	1.95	5.59	3.68	1.78
DZ2	53.31			2.55			3.38		
DZ3	67.04			5.59			2.06		
EX1	38.16	39.74	2.23	7.65	5.70	1.78	5.18	5.18	0.80
EX2	41.31			5.26			4.38		
EX3	47.13			4.18			5.99		
EY1	54.36	54.33	3.00	1.97	2.66	0.69	1.78	2.58	1.13
EY2	57.31			2.67			3.38		
EY3	51.31			3.35			6.57*		
EZ1	56.32	53.95	2.20	4.74	4.96	0.21	6.44	6.21	0.33

หมายเหตุ: * ไม่นำมาคิดรวมกับค่าเฉลี่ย เพราะมีค่าแตกต่างจากข้อมูลซ้ำอื่นๆ

ตารางที่ ง-1 ผลตะกั่วในถั่วเหลือง (ต่อ)

ตัวอย่าง	Pb ในราก (mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Pb ในต้น+ใบ (mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Pb ในเมล็ด (mg/kg)	เฉลี่ย	SD
EZ2	51.98			4.95			5.97		
EZ3	53.55			5.18			nd*		
FX1	53.84	52.90	1.93	2.39	1.95	0.93	1.46*	6.01	1.61
FX2	50.68			2.58			7.16		
FX3	54.19			0.88			4.87		
FY1	41.36	42.84	2.10	1.89	1.72	0.75	3.29	4.35	1.15
FY2	44.32			0.89			4.19		
FY3	35.69			2.38			5.57		
FZ1	54.27	52.66	1.48	3.88	2.68	1.37	6.08	5.18	1.27
FZ2	52.36			2.98			4.28		
FZ3	51.36			1.18			0.97*		
GX1	39.15	33.22	1.32	6.58	5.13	2.05	5.76	6.96	1.69
GX2	45.32			3.68			8.17		
GX3	37.29			nd*			1.26*		
GY1	39.51	36.55	2.09	6.48*	nd	nd	3.25*	nd	nd
GY2	56.39			nd			nd		
GY3	36.55			nd			nd		
GZ1	33.21	31.72	1.30	5.57*	0.72	0.61	6.65	5.97	0.95
GZ2	31.18			0.28			0.46*		
GZ3	30.78			1.15			5.29		

หมายเหตุ: * ไม่นำมาคิดรวมกับค่าเฉลี่ย เพราะมีค่าแตกต่างจากข้อมูลซ้ำอื่นๆ

ตารางที่ ง-2 ผลทองแดงในถั่วเหลือง

ตัวอย่าง	Cu ในราก (mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Cu ในต้น+ใบ(mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Cu ในเมล็ด (mg/kg)	เฉลี่ย	SD
c1	103.66	103.28	0.77	39.64	39.84	0.21	18.19	18.57	0.34
c2	103.80			40.08			18.86		
c3	102.39			39.81			18.65		
DX1	52.27	52.49	0.20	37.93	38.04	0.17	17.90	17.96	0.05
DX2	52.66			37.95			17.99		
DX3	52.53			38.24			17.99		
DY1	74.04	74.17	0.31	26.84	26.89	0.15	14.29	14.52	0.20
DY2	74.53			27.07			14.58		
DY3	73.94			26.77			14.69		
DZ1	56.65	56.32	0.30	24.24	24.16	0.14	16.19	16.35	0.20
DZ2	56.25			24.25			16.59		
DZ3	56.06			23.99			16.27		
EX1	69.25	69.17	0.12	11.68	11.55	0.15	18.48	18.55	0.11
EX2	69.24			11.38			18.68		
EX3	69.03			11.59			18.49		
EY1	64.76	65.12	0.40	20.07	19.97	0.18	9.99	10.06	0.11
EY2	65.56			20.07			9.99		
EY3	65.06			19.76			10.19		
EZ1	92.65	93.18	0.47	31.13	31.38	0.34	16.66	16.73	0.12

ตารางที่ ง-2 ผลทองแดงในถั่วเหลือง (ต่อ)

ตัวอย่าง	Cu ในราก (mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Cu ในต้น+ใบ(mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Cu ในเมล็ด (mg/kg)	เฉลี่ย	SD
EZ2	93.55			31.24			16.8840		
EZ3	93.34			31.78			16.6596		
FX1	66.74	67.01	0.27	16.19	16.09	0.10	16.6736	16.77	0.10
FX2	66.97			15.99			16.8751		
FX3	67.29			16.08			16.7859		
FY1	69.24	69.04	0.26	23.99	24.32	0.28	16.6930	16.62	0.30
FY2	68.73			24.49			16.2948		
FY3	69.14			24.48			16.8858		
FZ1	80.75	81.14	0.46	25.28	25.31	0.05	16.9893	16.95	0.44
FZ2	81.02			25.37			16.4896		
FZ3	81.65			25.27			17.3762		
GX1	42.57	42.44	0.23	33.38	33.61	0.40	16.4791	16.57	0.10
GX2	42.57			33.37			16.6824		
GX3	42.17			34.08			16.5720		
GY1	42.17	42.33	0.14	37.48	37.77	0.32	17.7683	17.71	0.11
GY2	42.46			38.11			17.7888		
GY3	42.36			37.72			17.5778		
GZ1	55.06	59.29	3.66	35.66	35.59	0.07	14.1744	14.48	0.27
GZ2	61.30			35.57			14.5752		
GZ3	61.52			35.52			14.6984		

ตารางที่ ง-3 ผลแคดเมียมในถั่วเหลือง

ตัวอย่าง	Cd ในราก (mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Cd ในต้น+ใบ(mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Cd ในเมล็ด (mg/kg)	เฉลี่ย	SD
c1	12.96	13.35	0.48	8.48	8.11	0.32	2.29	2.19	0.26
c2	13.18			7.99			2.38		
c3	13.90			7.87			1.88		
DX1	11.82	10.71	1.52	5.68	5.22	0.44	1.70	1.56	0.23
DX2	8.97			4.79			1.29		
DX3	11.34			5.18			1.69		
DY1	9.00	10.01	0.88	4.38	4.02	0.34	0.89	0.83	0.05
DY2	10.64			3.99			0.79		
DY3	10.39			3.69			0.79		
DZ1	8.71	8.35	0.89	4.18	3.82	0.63	0.99	0.86	0.15
DZ2	9.01			3.08			0.89		
DZ3	7.34			4.19			0.69		
EX1	7.145	8.31	2.44	2.09	2.22	0.32	1.09	0.99	0.36
EX2	6.68			1.99			0.59		
EX3	11.12			2.59			1.29		
EY1	10.03	11.46	2.96	5.79	6.68	1.63	nd	nd	nd
EY2	9.48			5.68			nd		
EY3	14.87			8.57			nd		
EZ1	11.97	11.42	1.45	6.48	7.11	0.60	1.19	1.09	0.17

ตารางที่ ง-3 ผลแคดเมียมในถั่วเหลือง (ต่อ)

ตัวอย่าง	Cd ในราก (mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Cd ในต้น+ใบ (mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Cd ในเมล็ด (mg/kg)	เฉลี่ย	SD
EZ2	9.77			7.68			0.89		
EZ3	12.52			7.19			1.19		
FX1	4.57	5.03	0.50	4.69	4.66	0.35	0.59	0.36	0.31
FX2	4.96			4.29			0.49		
FX3	5.57			4.99			nd		
FY1	12.46	12.91	0.97	6.69	6.39	0.30	1.89	2.03	0.11
FY2	12.26			6.39			2.09		
FY3	14.03			6.09			2.09		
FZ1	5.09	4.76	0.30	4.99	5.42	0.44	0.29	0.39	0.26
FZ2	4.49			5.39			0.19		
FZ3	4.69			5.89			0.69		
GX1	11.74	10.81	0.90	6.29	6.42	0.11	0.89	0.62	0.25
GX2	10.76			6.49			0.39		
GX3	9.93			6.49			0.59		
GY1	7.89	6.61	1.19	3.79	3.55	0.32	nd	nd	nd
GY2	6.40			3.18			nd		
GY3	5.53			3.68			nd		
GZ1	6.79	7.67	0.83	3.69	3.32	0.35	1.89	1.92	0.65
GZ2	7.74			2.99			1.29		
GZ3	8.46			3.28			2.59		

ตารางที่ ง-4 ผลสังกะสีในถั่วเหลือง

ตัวอย่าง	Zn ในราก (mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Zn ในต้น+ใบ(mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Zn ในเมล็ด (mg/kg)	เฉลี่ย	SD
c1	350.97	341.47	0.22	302.24	303.25	0.42	247.02	246.57	0.03
c2	351.59			299.63			246.36		
c3	347.38			307.89			246.33		
DX1	124.45	123.86	0.52	175.29	175.70	0.25	148.10	140.36	0.67
DX2	123.66			178.46			136.02		
DX3	123.46			173.35			136.97		
DY1	132.81	132.93	0.57	149.22	143.76	0.49	71.99	71.56	0.45
DY2	133.55			139.56			71.62		
DY3	132.42			142.50			71.09		
DZ1	113.13	113.51	0.94	133.18	133.38	0.27	148.07	147.562	0.23
DZ2	114.58			136.28			144.96		
DZ3	112.81			130.69			149.64		
EX1	273.55	278.16	0.94	150.38	148.11	0.39	60.65	60.42	0.23
EX2	282.97			150.36			60.45		
EX3	277.97			143.58			60.17		
EY1	161.01	160.74	0.24	155.49	153.07	0.25	108.98	109.21	0.26
EY2	160.53			150.44			109.50		
EY3	160.69			153.27			109.14		

ตารางที่ ง-4 ผลสังกะสีในถั่วเหลือง (ต่อ)

ตัวอย่าง	Zn ในราก (mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Zn ในต้น+ใบ(mg/kg)	เฉลี่ย	SD	Zn ในเมล็ด (mg/kg)	เฉลี่ย	SD
EZ1	116.07	116.46	0.84	221.07	221.29	0.18	75.13	74.28	0.81
EZ2	117.43			223.21			74.22		
EZ3	115.89			219.59			73.50		
FX1	184.93	175.43	0.13	159.74	162.32	0.24	76.06	75.79	0.25
FX2	184.65			162.62			75.57		
FX3	187.15			164.59			75.73		
FY1	140.75	140.95	0.19	212.69	208.64	0.35	73.26	73.15	0.28
FY2	141.14			206.70			73.37		
FY3	140.95			206.53			72.83		
FZ1	199.85	190.35	0.32	175.65	175.23	0.35	71.25	70.66	0.80
FZ2	193.74			178.52			69.75		
FZ3	194.85			171.53			70.99		
GX1	107.47	108.36	0.79	196.64	195.97	0.20	196.72	196.72	0.16
GX2	108.64			197.60			195.78		
GX3	108.98			193.67			193.59		
GY1	98.25	97.26	0.87	144.69	141.74	0.25	182.58	182.58	0.19
GY2	96.59			140.24			179.92		
GY3	96.94			140.29			178.74		
GZ1	211.78	202.28	0.22	131.57	130.83	0.13	65.37	65.38	0.01
GZ2	209.56			131.64			65.37		
GZ3	214.10			129.29			65.39		

ตารางที่ ง-5 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินก่อนปลูกพืชของตะกั่ว

ตัวอย่าง	F1 (mg/kg)	เฉลี่ย	F2 (mg/kg)	เฉลี่ย	F3 (mg/kg)	เฉลี่ย	F4 (mg/kg)	เฉลี่ย	F5 (mg/kg)	เฉลี่ย	F6 (mg/kg)	เฉลี่ย
c1	4.19	4.32	38.46	39.50	8.79	9.92	107.70	109.14	1.89*	7.82	11.88*	3.59
c2	5.49		40.26		11.69		101.71*		6.89		3.59	
c3	3.29		39.77		9.29		112.02		9.49		nd	
DX1	nd	nd	30.09	31.52	14.29	14.16	133.98	132.44	7.89	8.39	4.29	3.86
DX2	nd		32.59		14.19		130.07		8.89		2.89	
DX3	nd		37.88*		13.99		133.26		12.49*		4.39	
DY1	nd	nd	35.18	33.72	15.69	15.46	143.34*	123.08	4.59	4.5986	4.89	4.39
DY2	nd		32.78		14.09		126.84		2.69		3.19	
DY3	nd		33.19		16.59		120.07		6.49		5.09	
DZ1	nd	nd	26.38	28.01	10.19	11.22	118.74	117.49	8.09*	16.99	nd	nd
DZ2	nd		29.28		12.79		116.25		19.29		nd	
DZ3	nd		28.37		10.69		91.22*		14.58		nd	
EX1	nd	nd	42.37	39.72	6.49	5.59	108.44*	92.14	7.59	8.59	nd	0.13
EX2	nd		38.30		10.40*		94.90		7.90		nd	
EX3	nd		38.50		5.90		91.10		10.30		0.13	
EY1	nd	nd	46.46*	37.52	7.19	8.99	117.10	115.79	6.79	4.34	nd	nd
EY2	nd		35.89		10.79		113.57		10.19*		nd	
EY3	nd		40.65		8.99		92.70*		3.59		nd	

หมายเหตุ: * ไม่นำมาคิดรวมกับค่าเฉลี่ย เพราะมีค่าแตกต่างจากข้อมูลซ้ำอื่นๆ

ตารางที่ ง-5 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงก่อนปลูกพืชของตะกั่ว (ต่อ)

ตัวอย่าง	F1 (mg/kg)	เฉลี่ย	F2 (mg/kg)	เฉลี่ย	F3 (mg/kg)	เฉลี่ย	F4 (mg/kg)	เฉลี่ย	F5 (mg/kg)	เฉลี่ย	F6 (mg/kg)	เฉลี่ย
EZ1	nd	nd	40.19	43.18	17.19	15.42	103.38	101.22	4.79	4.79	nd	nd
EZ2	nd		44.17		13.19		116.13*		nd		nd	
EZ3	nd		45.18		15.89		99.16		14.89*		nd	
FX1	nd	nd	30.68	30.24	15.19	14.75	113.83*	103.08	4.99	6.95	nd	1.16
FX2	nd		31.86		13.48		101.48		9.09		1.59	
FX3	nd		28.18		9.59		105.94		nd		2.69	
FY1	nd	nd	28.28	28.78	13.59	12.72	105.92	107.67	10.89	10.45	nd	nd
FY2	nd		22.77*		12.78		109.87		12.08		nd	
FY3	nd		29.28		8.79*		116.04*		8.39		nd	
FZ1	nd	nd	30.98	28.91	15.59	15.38	124.33	123.84	6.39*	12.29	7.49	6.46
FZ2	nd		26.77		18.27		102.58*		10.29		6.39	
FZ3	nd		28.97		12.29		123.60		14.18		5.49	
GX1	nd	nd	35.70	34.26	16.00	14.16	132.00	127.4750	11.50	12.49	4.10	5.89
GX2	nd		37.28		13.69		125.26		13.29		1.99*	
GX3	nd		29.79		12.79		125.16		22.69*		7.69	
GY1	nd	nd	28.19	22.06	16.99	15.29	109.57	105.41	13.19	12.53	14.39	12.53
GY2	nd		25.39		11.33		88.97*		nd		11.59	
GY3	nd		12.59		17.49		102.67		10.79		11.59	
GZ1	nd	nd	22.59	24.05	19.59	21.15	116.46	115.79	5.5983	5.59	14.99	13.56
GZ2	nd		29.09		21.39		100.96*		11.89*		12.19	
GZ3	nd		20.48		22.48		114.94		nd		13.49	

หมายเหตุ: * ไม่นำมาคิดรวมกับค่าเฉลี่ย เพราะมีค่าแตกต่างจากข้อมูลซ้ำอื่นๆ

ตารางที่ ง-6 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงหลังปลูกพืชของตะกั่ว

ตัวอย่าง	F1 (mg/kg)	เฉลี่ย	F2 (mg/kg)	เฉลี่ย	F3 (mg/kg)	เฉลี่ย	F4 (mg/kg)	เฉลี่ย	F5 (mg/kg)	เฉลี่ย	F6 (mg/kg)	เฉลี่ย
c1	nd	nd	27.46	29.87	7.68	7.23	93.53	93.61	13.19	13.72	5.59	6.56
c2	nd		32.08		0.69*		83.37		4.49*		6.39	
c3	nd		30.07		7.09		103.93		14.49		7.69	
DX1	nd	nd	5.48	6.43	4.38	5.62	146.96	146.09	19.58*	5.54	7.89	6.26
DX2	nd		7.39		4.79		143.24		4.99		4.59	
DX3	nd		13.79*		7.69		148.07		6.09		6.29	
DY1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	141.97	146.29	13.19*	4.94	6.99	7.3629
DY2	nd		nd		nd		151.33		8.99		7.29	
DY3	nd		nd		nd		145.56		4.69		7.79	
DZ1	nd	nd	nd	nd	4.88	2.92	138.16	139.86	19.58	20.9521	8.09	8.63
DZ2	nd		nd		nd		140.04		19.87		9.18	
DZ3	nd		nd		3.89		141.38		23.39		2.69*	
EX1	nd	nd	nd	2.38	3.19	2.66	113.33	112.09	11.39	14.3247	6.09	5.56
EX2	nd		7.28*		4.79		110.83		16.19		3.69	
EX3	nd		2.38		nd		112.13		15.39		6.89	
EY1	nd	nd	15.16	14.04	nd	0	115.88	115.22	5.29	5.82	11.78*	1.99
EY2	nd		14.48		nd		114.24		6.19		2.89	
EY3	nd		12.4		nd		115.55		13.79*		1.09	
EZ1	nd	nd	15.38	14.71	nd	nd	109.14	112.74	19.39	16.29	2.99	4.23

หมายเหตุ: * ไม่นำมาคิดรวมกับค่าเฉลี่ย เพราะมีค่าแตกต่างจากข้อมูลซ้ำอื่นๆ

ตารางที่ ง-6 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงหลังปลูกพืชของตะกั่ว (ต่อ)

ตัวอย่าง	F1 (mg/kg)	เฉลี่ย	F2 (mg/kg)	เฉลี่ย	F3 (mg/kg)	เฉลี่ย	F4 (mg/kg)	เฉลี่ย	F5 (mg/kg)	เฉลี่ย	F6 (mg/kg)	เฉลี่ย
EZ2	nd		12.99		nd		115.96		17.29		4.19	
EZ3	nd		15.77		nd		101.11*		12.19		5.49	
FX1	nd	nd	2.68	1.79	nd	nd	129.42	123.56	6.09	7.5	5.09	5.73
FX2	nd		0.79		nd		126.98		6.69		7.09	
FX3	nd		1.90		nd		114.30		9.80		5.00	
FY1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	122.38	128.54	22.57	17.18	9.99	8.66
FY2	nd		nd		nd		124.51		18.78		6.79	
FY3	nd		nd		nd		138.74		10.19*		9.19	
FZ1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	120.65	125.35	2.59*	13.96	6.2975	8.26
FZ2	nd		nd		nd		129.94		11.69		7.7969	
FZ3	nd		nd		nd		125.46		15.59		10.6968	
GX1	nd	nd	9.09	8.95	nd	nd	119.07	115.9987	13.39	11.99	8.29	7.73
GX2	nd		7.69		nd		112.17		9.59		7.09	
GX3	nd		10.08		nd		114.74		0.99*		7.79	
GY1	nd	nd	nd	nd	nd	1.16	132.84	128.08	21.39*	7.84	6.49	7.52
GY2	nd		nd		1.09		125.66		7.79		9.69	
GY3	nd		nd		2.39		125.74		7.89		12.39	
GZ1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	124.90	131.97	26.00*	7.26	5.40	5.53
GZ2	nd		nd		nd		131.16		9.69		4.09	
GZ3	nd		nd		nd		139.87		13.09		7.09	

หมายเหตุ: * ไม่นำมาคิดรวมกับค่าเฉลี่ย เพราะมีค่าแตกต่างจากข้อมูลซ้ำอื่นๆ

ตารางที่ ง-7 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงก่อนปลูกพืชของทองแดง

ตัวอย่าง	F1 (mg/kg)	เฉลี่ย	F2 (mg/kg)	เฉลี่ย	F3 (mg/kg)	เฉลี่ย	F4 (mg/kg)	เฉลี่ย	F5 (mg/kg)	เฉลี่ย	F6 (mg/kg)	เฉลี่ย
c1	1.19	1.19	4.19	4.16	4.29	4.23	57.54	57.42	15.78	15.95	8.79	8.59
c2	1.29		4.29		3.79		57.55		15.98		8.49	
c3	1.09		3.99		4.59		57.16		16.08		8.49	
DX1	1.29	1.36	4.19	4.29	4.59	4.33	61.79	61.75	16.39	16.26	9.09	8.96
DX2	1.49		4.49		4.29		61.68		16.29		8.79	
DX3	1.29		4.19		4.09		61.78		16.09		8.99	
DY1	1.29	1.29	3.89	3.86	4.39	4.33	62.17	62.21	15.09	15.32	11.39	11.39
DY2	1.29		4.09		4.09		62.37		15.49		11.49	
DY3	1.29		3.59		4.49		62.08		15.39		11.29	
DZ1	1.79	1.29	3.79	3.93	4.09	4.86	57.77	57.06	17.79	18.02	10.29	10.16
DZ2	0.69		4.19		5.19		56.57		18.29		9.89	
DZ3	1.39		3.79		5.29		56.85		17.98		10.29	
EX1	0.99	0.89	4.79	4.765	4.09	4.19	57.17	56.55	16.09	15.99	8.89	8.96
EX2	0.70		4.80		4.30		56.60		16.10		8.90	
EX3	1.00		4.70		4.20		55.90		15.80		9.10	
EY1	0.49	0.63	4.29	4.33	4.39	4.33	56.25	55.86	14.58	14.52	9.59	9.76
EY2	0.69		3.99		4.49		55.68		14.69		9.79	
EY3	0.69		4.69		4.09		55.64		14.28		9.89	

ตารางที่ ง-7 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงก่อนปลูกพืชของทองแดง (ต่อ)

ตัวอย่าง	F1 (mg/kg)	เฉลี่ย	F2 (mg/kg)	เฉลี่ย	F3 (mg/kg)	เฉลี่ย	F4 (mg/kg)	เฉลี่ย	F5 (mg/kg)	เฉลี่ย	F6 (mg/kg)	เฉลี่ย
EZ1	0.40	0.33	4.99	4.79	4.59	4.39	56.89	56.64	16.19	16.32	11.29	11.36
EZ2	0.39		4.79		4.19		56.66		16.39		11.49	
EZ3	0.19		4.59		4.39		56.37		16.39		11.29	
FX1	1.69	1.89	3.39	3.29	3.99	3.73	53.66	53.39	13.69	13.35	8.99	8.76
FX2	1.89		3.49		3.49		53.14		13.18		8.79	
FX3	2.09		2.99		3.69		53.37		13.19		8.49	
FY1	1.69	1.63	3.49	3.36	3.69	3.59	54.67	54.45	12.89	12.82	8.39	8.69
FY2	1.89		3.39		3.69		54.34		12.88		8.99	
FY3	1.29		3.19		3.39		54.37		12.69		8.69	
FZ1	0.79	0.93	3.29	3.43	4.19	4.16	59.47	58.78	14.59	14.75	8.69	8.69
FZ2	0.99		3.39		4.09		58.63		14.73		8.59	
FZ3	0.99		3.59		4.16		58.25		14.81		8.79	
GX1	2.20	1.96	4.30	4.26	3.90	4.16	63.80	63.28	13.70	13.76	10.70	10.56
GX2	1.79		4.39		3.99		62.78		13.69		10.39	
GX3	1.89		4.09		4.59		63.28		13.89		10.59	
GY1	0.59	0.59	4.09	3.93	4.49	4.26	56.38	56.35	13.29	13.36	9.59	9.59
GY2	0.49		4.09		4.49		56.18		13.19		9.89	
GY3	0.69		3.59		3.79		56.48		13.59		9.29	
GZ1	0.39	0.76	4.19	3.73	4.09	3.99	57.98	57.77	14.69	14.82	10.49	10.66
GZ2	0.69		3.39		4.09		57.68		14.89		10.79	
GZ3	1.19		3.59		3.79		57.67		14.89		10.69	

ตารางที่ ง-8 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงหลังปลูกพืชของทองแดง

ตัวอย่าง	F1 (mg/kg)	เฉลี่ย	F2 (mg/kg)	เฉลี่ย	F3 (mg/kg)	เฉลี่ย	F4 (mg/kg)	เฉลี่ย	F5 (mg/kg)	เฉลี่ย	F6 (mg/kg)	เฉลี่ย
c1	2.99	3.16	5.29	5.39	0.59	0.56	57.75	58.03	18.08	17.79	10.89	10.86
c2	3.19		5.39		0.49		58.28		17.59		10.89	
c3	3.29		5.49		0.59		58.06		17.68		10.79	
DX1	1.89	1.89	1.29	1.19	0.39	0.46	47.75	47.60	15.88	15.69	8.69	8.76
DX2	1.89		1.19		0.59		47.88		15.59		8.79	
DX3	1.89		1.09		0.39		47.19		15.59		8.79	
DY1	1.19	0.89	1.29	1.19	0.79	0.76	46.89	46.71	18.89	18.85	8.29	8.29
DY2	0.79		1.29		0.49		46.78		18.79		8.39	
DY3	0.69		0.99		0.99		46.45		18.88		8.19	
DZ1	2.19	2.06	1.29	1.26	0.79	0.66	44.15	44.60	15.08	14.88	8.29	8.32
DZ2	1.99		1.19		0.49		44.85		14.78		8.39	
DZ3	1.99		1.29		0.69		44.79		14.79		8.29	
EX1	1.49	1.69	2.09	1.89	0.89	0.96	42.07	41.80	23.58	23.61	7.79	7.62
EX2	1.79		1.89		0.99		41.67		23.58		7.59	
EX3	1.79		1.69		0.99		41.67		23.68		7.49	
EY1	0.79	0.96	2.49	2.43	0.99	0.79	48.35	48.46	18.88	18.78	7.79	7.72
EY2	0.99		2.59		0.69		48.57		18.59		7.69	
EY3	1.09		2.19		0.69		48.48		18.89		7.69	
EZ1	0.39	0.46	3.19	3.09	0.89	0.76	42.27	42.31	15.19	15.15	12.39	12.45

ตารางที่ ง-8 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงหลังปลูกพืชของทองแดง (ต่อ)

ตัวอย่าง	F1 (mg/kg)	เฉลี่ย	F2 (mg/kg)	เฉลี่ย	F3 (mg/kg)	เฉลี่ย	F4 (mg/kg)	เฉลี่ย	F5 (mg/kg)	เฉลี่ย	F6 (mg/kg)	เฉลี่ย
EZ2	0.59		3.09		0.69		42.48		14.99		12.49	
EZ3	0.39		2.99		0.69		42.16		15.28		12.48	
FX1	2.29	2.26	1.59	1.4323	1.09	1.13	43.77	43.72	21.48	21.42	9.69	9.69
FX2	2.39		1.29		1.09		43.49		21.29		9.69	
FX3	2.10		1.40		1.20		43.90		21.50		9.70	
FY1	2.09	2.06	1.29	1.1641	0.49	0.66	44.46	44.60	28.26	28.11	8.79	8.72
FY2	2.19		0.99		0.69		44.56		28.18		8.59	
FY3	1.89		1.19		0.79		44.78		27.88		8.79	
FZ1	0.99	0.93	0.69	0.5655	0.99	0.93	49.08	49.54	13.59	13.39	8.09	7.93
FZ2	0.79		0.39		0.99		49.88		13.39		7.59	
FZ3	0.99		0.59		0.79		49.68		13.19		8.09	
GX1	2.79	2.73	1.19	1.2322	0.39	0.56	48.19	48.01	22.79	22.79	9.69	9.39
GX2	2.79		1.39		0.59		47.99		22.69		9.19	
GX3	2.59		1.09		0.69		47.87		22.88		9.29	
GY1	2.09	1.76	0.79	0.8987	0.99	1.09	45.18	45.41	17.09	17.06	9.69	9.39
GY2	1.49		0.89		1.19		45.48		16.99		9.19	
GY3	1.69		0.99		1.09		45.58		17.09		9.29	
GZ1	1.00	1.03	0.80	0.86	1.10	1.03	44.30	44.59	21.30	21.32	8.80	8.89
GZ2	0.89		1.09		0.99		44.78		21.39		8.99	
GZ3	1.19		0.69		0.99		44.69		21.29		8.89	

ตารางที่ ง-9 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงก่อนปลูกพืชของแคดเมียม

ตัวอย่าง	F1 (mg/kg)	เฉลี่ย	F2 (mg/kg)	เฉลี่ย	F3 (mg/kg)	เฉลี่ย	F4 (mg/kg)	เฉลี่ย	F5 (mg/kg)	เฉลี่ย	F6 (mg/kg)	เฉลี่ย
c1	nd	nd	2.19	2.36	0.59	0.69	nd	nd	nd	nd	nd	nd
c2	nd		2.39		0.49		nd		nd		nd	
c3	nd		2.49		0.99		nd		nd		nd	
DX1	nd	nd	2.19	2.26	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
DX2	nd		2.19		nd		nd		nd		nd	
DX3	nd		2.39		nd		nd		nd		nd	
DY1	nd	nd	2.09	2.16	0.39	0.39	nd	nd	nd	nd	nd	nd
DY2	nd		2.49		0.29		nd		nd		nd	
DY3	nd		1.89		0.49		nd		nd		nd	
DZ1	nd	nd	1.59	1.63	0.29	0.39	nd	nd	nd	nd	nd	nd
DZ2	nd		1.79		0.49		nd		nd		nd	
DZ3	nd		1.49		0.39		nd		nd		nd	
EX1	nd	nd	2.29	2.36	0.49	0.59	nd	nd	nd	nd	nd	nd
EX2	nd		2.40		0.70		nd		nd		nd	
EX3	nd		2.40		0.60		nd		nd		nd	
EY1	nd	nd	2.09	1.93	0.49	0.53	nd	nd	nd	nd	nd	nd
EY2	nd		1.89		0.69		nd		nd		nd	
EY3	nd		1.79		0.39		nd		nd		nd	

ตารางที่ ง-9 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงก่อนปลูกพืชของแคดเมียม (ต่อ)

ตัวอย่าง	F1 (mg/kg)	เฉลี่ย	F2 (mg/kg)	เฉลี่ย	F3 (mg/kg)	เฉลี่ย	F4 (mg/kg)	เฉลี่ย	F5 (mg/kg)	เฉลี่ย	F6 (mg/kg)	เฉลี่ย
EZ1	nd	nd	1.99	1.99	0.59	0.63	nd	nd	nd	nd	nd	nd
EZ2	nd		2.09		0.59		nd		nd		nd	
EZ3	nd		1.89		0.69		nd		nd		nd	
FX1	nd	nd	1.89	2.13	0.09	0.19	nd	nd	nd	nd	nd	nd
FX2	nd		2.39		0.29		nd		nd		nd	
FX3	nd		2.09		0.19		nd		nd		nd	
FY1	nd	nd	1.69	1.73	nd	0.13	nd	nd	nd	nd	nd	nd
FY2	nd		1.69		0.09		nd		nd		nd	
FY3	nd		1.79		0.29		nd		nd		nd	
FZ1	nd	nd	2.09	2.19	0.39	0.39	nd	nd	nd	nd	nd	nd
FZ2	nd		2.39		0.29		nd		nd		nd	
FZ3	nd		2.09		0.49		nd		nd		nd	
GX1	nd	nd	1.80	1.66	0.20	0.33	nd	nd	nd	0.09	nd	nd
GX2	nd		1.59		0.39		nd		0.19		nd	
GX3	nd		1.59		0.39		nd		0.10		nd	
GY1	nd	nd	1.69	1.69	0.69	0.59	nd	nd	nd	0	nd	nd
GY2	nd		1.89		0.49		nd		nd		nd	
GY3	nd		1.49		0.59		nd		nd		nd	
GZ1	nd	nd	1.59	1.43	0.69	0.63	nd	nd	0.03	0.03	nd	nd
GZ2	nd		1.39		0.59		nd		nd		nd	
GZ3	nd		1.29		0.59		nd		nd		nd	

ตารางที่ ง-10 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงหลังปลูกพืชของแคดเมียม

ตัวอย่าง	**F1 (mg/kg)**	**เฉลี่ย**	**F2 (mg/kg)**	**เฉลี่ย**	**F3 (mg/kg)**	**เฉลี่ย**	**F4 (mg/kg)**	**เฉลี่ย**	**F5 (mg/kg)**	**เฉลี่ย**	**F6 (mg/kg)**	**เฉลี่ย**
c1	nd	nd	3.89	3.76	1.39	1.43	nd	nd	nd	nd	0.09	0.09
c2	nd		3.59		1.49		nd		nd		nd	
c3	nd		3.77		1.39		nd		nd		nd	
DX1	nd	nd	4.19	4.19	2.49	2.33	nd	nd	nd	nd	nd	nd
DX2	nd		4.29		2.39		nd		nd		nd	
DX3	nd		4.09		2.09		nd		nd		nd	
DY1	nd	nd	3.59	3.56	2.19	2.23	nd	nd	nd	nd	0.20	0.16
DY2	nd		3.39		1.99		nd		nd		nd	
DY3	nd		3.69		2.49		nd		nd		0.29	
DZ1	nd	nd	3.39	3.33	2.49	2.19	nd	nd	nd	nd	nd	nd
DZ2	nd		3.29		1.99		nd		nd		nd	
DZ3	nd		3.29		2.09		nd		nd		nd	
EX1	nd	nd	3.69	3.99	0.69	0.93	nd	nd	nd	nd	nd	nd
EX2	nd		4.19		0.99		nd		nd		nd	
EX3	nd		4.09		1.09		nd		nd		nd	
EY1	nd	nd	3.99	4.16	1.09	1.16	nd	nd	nd	nd	nd	nd
EY2	nd		4.29		1.39		nd		nd		nd	
EY3	nd		4.19		0.99		nd		nd		nd	

ตารางที่ ง-10 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงหลังปลูกพืชของแคดเมียม (ต่อ)

ตัวอย่าง	F1 (mg/kg)	เฉลี่ย	F2 (mg/kg)	เฉลี่ย	F3 (mg/kg)	เฉลี่ย	F4 (mg/kg)	เฉลี่ย	F5 (mg/kg)	เฉลี่ย	F6 (mg/kg)	เฉลี่ย
EZ1	nd	nd	3.59	3.63	1.89	2.13	nd	nd	nd	nd	nd	0.46
EZ2	nd		3.59		2.29		nd		nd		0.49	
EZ3	nd		3.69		2.19		nd		nd		0.89	
FX1	nd	nd	3.79	3.63	0.69	0.56	nd	nd	nd	nd	0.39	0.29
FX2	nd		3.39		0.59		nd		nd		nd	
FX3	nd		3.70		0.40		nd		nd		0.50	
FY1	nd	nd	3.99	3.86	2.39	2.43	nd	nd	nd	nd	0.29	0.43
FY2	nd		3.89		2.69		nd		nd		0.49	
FY3	nd		3.69		2.19		nd		nd		0.49	
FZ1	nd	nd	3.59	3.53	2.79	2.36	nd	nd	nd	nd	nd	0.06
FZ2	nd		3.29		1.99		nd		nd		nd	
FZ3	nd		3.69		2.29		nd		nd		0.06	
GX1	nd	nd	3.59	3.59	1.99	2.06	nd	nd	nd	nd	0.10	0.29
GX2	nd		3.19		2.29		nd		nd		0.49	
GX3	nd		3.99		1.89		nd		nd		0.29	
GY1	nd	nd	3.39	3.56	2.19	1.73	nd	nd	nd	nd	0.69	0.56
GY2	nd		3.49		1.59		nd		nd		0.69	
GY3	nd		3.79		1.39		nd		nd		0.29	
GZ1	nd	nd	3.40	3.43	2.50	2.26	nd	nd	nd	nd	0.00	0.26
GZ2	nd		3.29		2.29		nd		nd		0.49	
GZ3	nd		3.59		1.99		nd		nd		0.29	

ตารางที่ ง-11 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงก่อนปลูกพืชของสังกะสี

ตัวอย่าง	F1 (mg/kg)	เฉลี่ย	F2 (mg/kg)	เฉลี่ย	F3 (mg/kg)	เฉลี่ย	F4 (mg/kg)	เฉลี่ย	F5 (mg/kg)	เฉลี่ย	F6 (mg/kg)	เฉลี่ย
c1	11.68	11.65	68.04	67.95	nd	nd	78.64	78.42	7.39	7.09	16.78	16.08
c2	11.59		67.77		nd		78.17		6.69		15.79	
c3	11.69		68.05		nd		78.44		7.19		15.68	
DX1	8.09	8.12	22.07	21.81	nd	nd	142.79	149.55	7.08	6.95	10.28	10.42
DX2	7.89		21.48		nd		154.90		7.19		10.49	
DX3	8.39		21.89		nd		150.95		6.59		10.49	
DY1	5.99	5.52	8.99	9.39	19.89	20.25	182.94	181.20	10.59	10.45	9.59	9.55
DY2	5.59		9.69		20.48		182.89		10.69		9.49	
DY3	4.99		9.48		20.37		177.76		10.08		9.58	
DZ1	7.38	7.59	5.28	4.82	nd	nd	214.70	214.11	9.48	9.42	18.57	18.37
DZ2	7.68		4.88		nd		212.67		9.28		17.66	
DZ3	7.69		4.29		nd		214.97		9.49		18.89	
EX1	6.69	6.62	43.66	43.63	27.37	27.6438	187.83	192.83	8.89	8.49	11.88	11.48
EX2	6.59		43.66		27.67		191.83		8.29		11.48	
EX3	6.59		43.56		27.87		198.82		8.29		11.08	
EY1	6.29	6.19	49.24	49.36	1.48	0.9927	146.76	149.85	8.78	8.52	8.68	8.55
EY2	6.29		49.77		0.59		148.88		8.49		8.29	
EY3	5.99		49.07		0.89		153.90		8.29		8.69	

ตารางที่ ง-11 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงก่อนปลูกพืชของสังกะสี (ต่อ)

ตัวอย่าง	F1 (mg/kg)	เฉลี่ย	F2 (mg/kg)	เฉลี่ย	F3 (mg/kg)	เฉลี่ย	F4 (mg/kg)	เฉลี่ย	F5 (mg/kg)	เฉลี่ย	F6 (mg/kg)	เฉลี่ย
EZ1	4.09	3.99	53.66	52.70	0.39	0.22	125.89	125.88	12.49	12.25	15.08	14.82
EZ2	3.99		52.98		0.19		125.93		12.19		14.49	
EZ3	3.89		51.45		0.09		125.83		12.08		14.87	
FX1	8.79	9.26	25.58	25.55	4.19	4.36	135.86	135.94	9.19	9.32	9.58	9.36
FX2	9.59		25.49		3.99		137.97		9.69		9.79	
FX3	9.40		25.60		4.90		134		9.10		8.70	
FY1	9.98	9.65	22.07	22.41	0.05	0.05	143.79	143.84	9.58	9.55	13.17	13.08
FY2	9.69		22.579		nd		143.83		9.68		12.88	
FY3	9.29		22.58		nd		143.90		9.39		13.19	
FZ1	1.99	1.39	7.79	7.72	16.38	16.4901	165.89	163.57	7.39	6.96	22.08	21.62
FZ2	1.19		7.59		16.98		162.90		6.69		21.28	
FZ3	0.99		7.79		16.09		161.92		6.79		21.49	
GX1	8.49	8.52	28.99	28.68	0.19	0.19	148.95	147.26	5.19	5.62	11.59	11.32
GX2	8.79		28.19		0.19		143.95		6.29		11.29	
GX3	8.29		28.88		nd		148.88		5.39		11.08	
GY1	5.49	5.23	18.18	17.89	2.09	1.9288	134.91	132.92	7.59	7.39	46.77	46.31
GY2	4.79		17.79		1.89		129.93		7.19		45.98	
GY3	5.39		17.68		1.79		133.91		7.39		46.17	
GZ1	3.10	3.06	6.90	6.76	2.50	2.4645	165	164.62	12.70	12.83	12.40	12.26
GZ2	2.59		6.79		2.49		163.92		13.09		12.29	
GZ3	3.49		6.59		2.39		164.95		12.69		12.09	

ตารางที่ ง-12 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงหลังปลูกพืชของสังกะสี

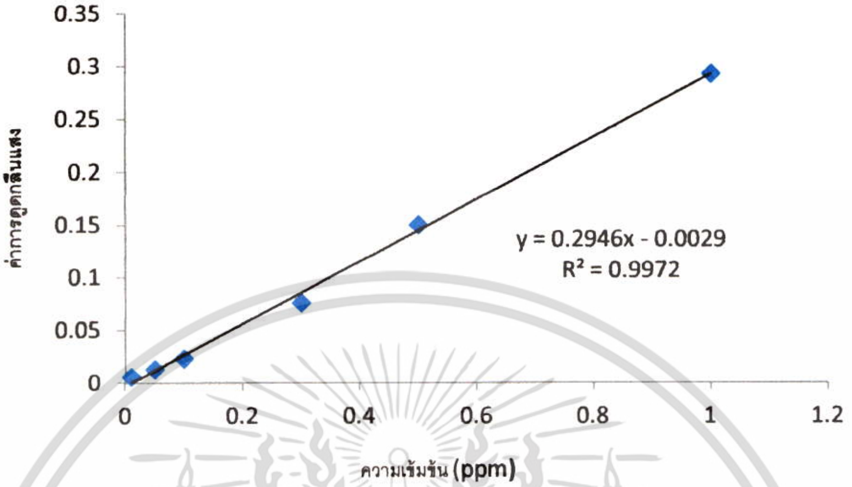
ตัวอย่าง	F1 (mg/kg)	เฉลี่ย	F2 (mg/kg)	เฉลี่ย	F3 (mg/kg)	เฉลี่ย	F4 (mg/kg)	เฉลี่ย	F5 (mg/kg)	เฉลี่ย	F6 (mg/kg)	เฉลี่ย
c1	4.09	4.39	40.15	40.42	4.19	4.06	133.80	135.48	14.38	13.98	5.68	5.72
c2	4.49		40.46		3.89		134.82		13.68		5.68	
c3	4.59		40.66		4.09		137.84		13.88		5.78	
DX1	11.79	12.13	15.49	15.52	4.49	4.53	170.97	169.94	15.39	15.36	7.39	7.42
DX2	12.39		15.69		4.39		168.94		15.49		7.59	
DX3	12.19		15.39		4.69		169.92		15.19		7.29	
DY1	2.49	2.39	5.69	5.56	3.19	3.23	198.88	194.57	13.09	13.29	10.39	10.35
DY2	2.39		5.29		3.89		192.88		13.29		10.39	
DY3	2.29		5.69		2.59		191.94		13.49		10.29	
DZ1	2.79	1.99	1.39	0.52	3.89	4.06	180.86	178.51	12.89	12.58	7.79	7.79
DZ2	1.89		0.29		3.79		178.89		12.49		7.79	
DZ3	1.29		nd		4.49		175.79		12.38		7.78	
EX1	1.79	1.89	49.07	48.75	3.49	3.49	120.89	128.63	13.49	13.76	6.69	6.96
EX2	2.30		48.30		3.30		129		13.90		7.00	
EX3	1.60		48.90		3.70		136		13.90		7.20	
EY1	2.59	2.13	42.45	42.53	3.19	3.06	114.84	114.53	13.58	13.68	8.68	8.98
EY2	1.99		42.85		2.89		116.95		13.99		8.79	
EY3	1.79		42.24		3.09		111.80		13.48		9.48	

ตารางที่ ง-12 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินปรับปรุงหลังปลูกพืชของสังกะสี (ต่อ)

ตัวอย่าง	F1 (mg/kg)	เฉลี่ย	F2 (mg/kg)	เฉลี่ย	F3 (mg/kg)	เฉลี่ย	F4 (mg/kg)	เฉลี่ย	F5 (mg/kg)	เฉลี่ย	F6 (mg/kg)	เฉลี่ย
EZ1	1.19	0.63	43.89	43.38	6.99	6.99	120.97	121.58	17.19	17.12	12.89	12.59
EZ2	0.69		43.96		7.39		123.87		16.98		12.58	
EZ3	nd		42.27		6.59		119.91		17.19		12.29	
FX1	4.79	4.29	18.58	18.41	2.29	2.42	133.86	131.17	13.38	13.35	9.88	9.98
FX2	4.39		18.06		2.29		131.76		13.17		9.87	
FX3	3.69		18.58		2.69		127.89		13.49		10.19	
FY1	3.09	2.89	13.28	13.38	2.99	3.26	145.83	144.48	9.68	9.72	6.68	6.95
FY2	3.19		13.47		2.59		141.75		9.78		6.98	
FY3	2.39		13.38		4.19		145.88		9.69		7.19	
FZ1	nd	nd	5.89	5.75	1.79	2.06	166.87	166.79	14.19	14.38	9.39	9.35
FZ2	nd		5.28		2.19		165.72		14.47		9.37	
FZ3	nd		6.08		2.19		167.79		14.48		9.28	
GX1	4.30	4.16	31.00	30.89	5.40	4.99	155	158.61	11.50	11.19	10.50	10.42
GX2	4.39		30.68		4.99		158.92		11.29		9.79	
GX3	3.79		30.98		4.59		161.92		10.79		10.99	
GY1	1.89	2.56	9.49	9.42	2.49	2.46	158.95	161.61	13.19	12.92	11.08	11.19
GY2	3.19		9.79		2.89		165.92		12.79		11.07	
GY3	2.59		8.99		1.99		159.95		12.79		11.39	
GZ1	0.99	0.46	2.29	1.79	2.79	2.79	170.92	171.90	14.09	14.09	9.69	9.69
GZ2	0		1.29		2.99		169.92		13.99		9.49	
GZ3	0.39		1.79		2.59		174.87		14.19		9.89	

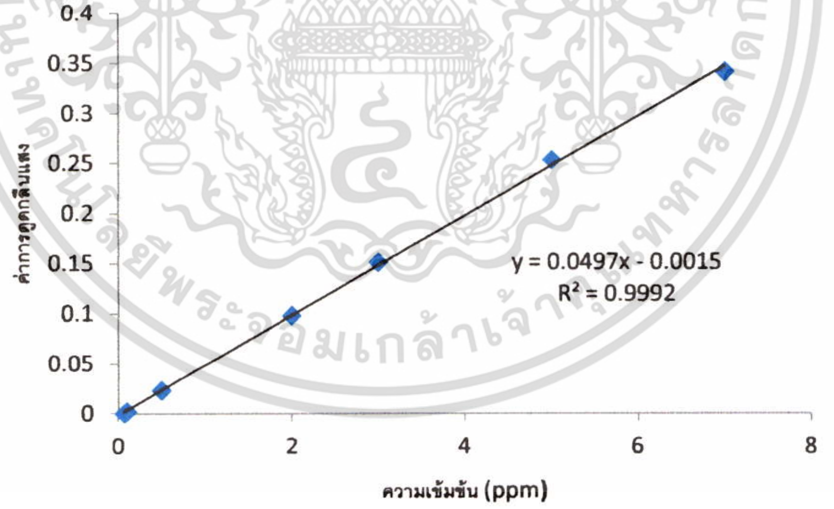
ตัวอย่างกราฟมาตรฐานโลหะหนักในดินและพืช

แคดเมียม



รูปที่ ง-1 กราฟมาตรฐานของแคดเมียมทั้งหมดของดินและพืช

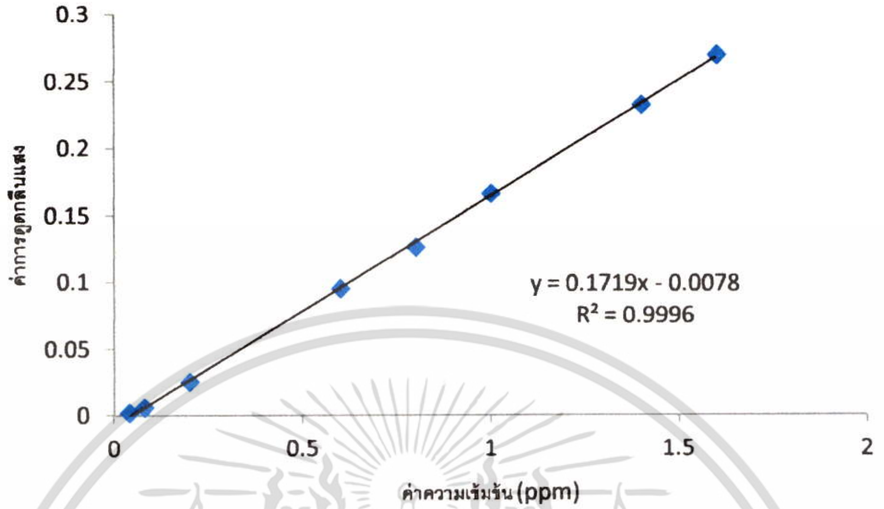
ตะกั่ว



รูปที่ ง-2 กราฟมาตรฐานของตะกั่วทั้งหมดของดินและพืช

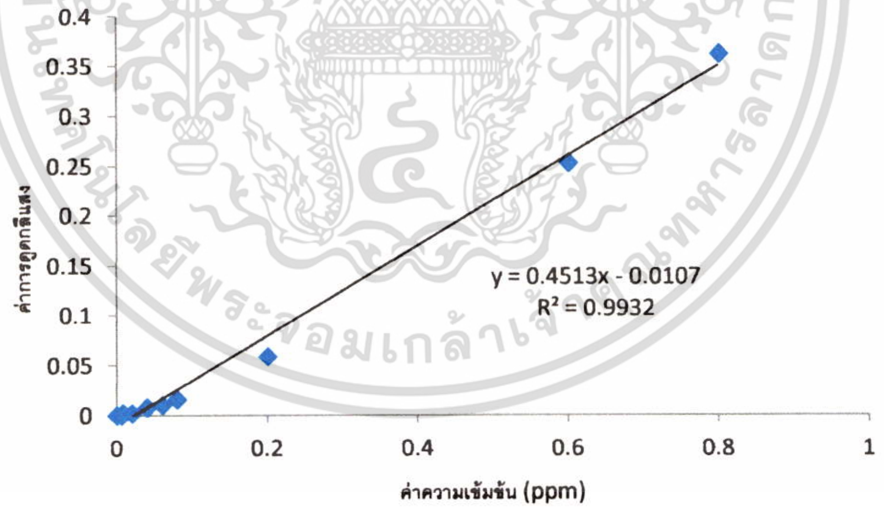
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทองแดง



รูปที่ ง-3 กราฟมาตรฐานของทองแดงทั้งหมดของดินและพืช

สังกะสี



รูปที่ ง-4 กราฟมาตรฐานของสังกะสีทั้งหมดของดินและพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณโลหะหนักทั้งหมด

1. หาความเข้มข้นจากกราฟมาตรฐานทองแดงรูปที่ ง-3 ได้สมการดังนี้

$$y = 0.1719x - 0.0078$$

แทนค่า y ด้วยค่าดูดกลืนแสงของตัวอย่างดินหรือพืชเท่ากับ 0.077 จะได้ x = 0.49 ดังนั้นดินหรือพืช จะมีความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 0.49 ppm (mg/L)

2. หาปริมาณทองแดง (mg/kg) ในดินหรือพืช

   จากค่าความเข้มข้นที่คำนวณได้ ข้อ 1 ดินหรือพืชจะมีความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมด เท่ากับ 0.49 ppm (mg/L) คือ

   ในสารละลาย 1000 ml มีทองแดงทั้งหมด 0.49 mg

   ถ้าสารละลาย 100 ml จะมีทองแดงทั้งหมด $\frac{0.49 \times 100 \times 1 \text{ (เท่า)}}{1000}$ = 0.049 mg

   เมื่อดินหรือพืชมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 1.0012 g ดังนั้น

   ในดินหรือพืช 1.0012 g มีทองแดงอยู่ทั้งหมด 0.049 mg

   ถ้าในดินหรือพืช 1000 g จะมีทองแดงอยู่ทั้งหมด $\frac{0.049 \times 1000}{1.0012}$ = 48.94 mg/kg

**สารปรับปรุงดิน ดิน พืช ของโลหะทุกชนิด คำนวณในลักษณะเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลปัจจัยการสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation factor, BAF) และการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก (Translocation factor, TF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-1 BAF ในตะกั่ว

ตัวอย่าง	Soil (mg/kg)	PLANTS (mg/kg)	BAF	เฉลี่ย	sd
c1	163.10	82.3900	0.51	0.51	0.02
c2	168.03	81.6767	0.49		
c3	164.55	86.3159	0.52		
DX1	185.20	69.6752	0.38	0.42	0.08
DX2	189.98	70.1319	0.37		
DX3	184.99	95.3973	0.52		
DY1	171.36	57.9739	0.34	0.34	0.03
DY2	177.28	65.8678	0.37		
DY3	186.38	57.3367	0.31		
DZ1	160.40	62.8866	0.39	0.40	0.04
DZ2	165.57	59.2542	0.36		
DZ3	169.25	74.6907	0.44		
EX1	156.00	51.0039	0.33	0.34	0.02
EX2	156.90	50.9530	0.32		
EX3	156.88	57.3032	0.37		
EY1	164.90	58.1207	0.35	0.38	0.02
EY2	161.95	63.3644	0.39		
EY3	153.70	61.2450	0.40		
EZ1	169.05	67.5174	0.40	0.38	0.02
EZ2	162.43	62.9146	0.39		
EZ3	163.97	58.7354	0.36		
FX1	156.15	57.7018	0.37	0.37	0.01
FX2	157.83	60.4274	0.38		
FX3	166.08	59.9552	0.36		
FY1	163.17	46.5439	0.29	0.28	0.01
FY2	178.81	49.4064	0.28		
FY3	160.08	43.6514	0.27		
FZ1	141.99	64.2421	0.45	0.40	0.05
FZ2	146.39	59.6248	0.41		
FZ3	150.71	53.5130	0.36		
GX1	164.17	51.5049	0.31	0.31	0.07
GX2	151.28	57.1770	0.38		
GX3	149.37	36.1475	0.24		
GY1	153.47	49.2583	0.32	0.30	0.07
GY2	156.17	55.7378	0.36		
GY3	158.02	33.9929	0.22		
GZ1	150.08	45.4405	0.30	0.26	0.04
GZ2	142.90	31.9338	0.22		
GZ3	144.75	37.2366	0.26		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-2 TF ในตะกั่ว

ตัวอย่าง	seed/total	root/total	seed/root	เฉลี่ย	sd
c1	0.96	0.04	0.05	0.04	0.00
c2	0.96	0.04	0.05		
c3	0.96	0.04	0.04		
DX1	0.98	0.02	0.02	0.03	0.01
DX2	0.97	0.03	0.03		
DX3	0.98	0.02	0.02		
DY1	1.00	0.00	0.00	0.03	0.02
DY2	0.97	0.03	0.03		
DY3	0.96	0.04	0.04		
DZ1	0.96	0.04	0.04	0.03	0.01
DZ2	0.97	0.03	0.03		
DZ3	0.99	0.01	0.01		
EX1	0.96	0.04	0.04	0.04	0.01
EX2	0.96	0.04	0.04		
EX3	0.95	0.05	0.05		
EY1	0.99	0.01	0.01	0.01	0.01
EY2	0.98	0.02	0.03		
EY3	1.00	0.00	0.00		
EZ1	0.92	0.08	0.09	0.05	0.05
EZ2	0.94	0.06	0.06		
EZ3	1.00	0.00	0.00		
FX1	1.00	0.00	0.00	0.08	0.08
FX2	0.86	0.14	0.16		
FX3	0.92	0.08	0.09		
FY1	0.95	0.05	0.06	0.08	0.02
FY2	0.92	0.08	0.09		
FY3	0.91	0.09	0.09		
FZ1	0.92	0.08	0.09	0.05	0.04
FZ2	0.95	0.05	0.05		
FZ3	1.00	0.00	0.00		
GX1	0.95	0.05	0.06	0.05	0.05
GX2	0.91	0.09	0.10		
GX3	1.00	0.00	0.00		
GY1	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
GY2	1.00	0.00	0.00		
GY3	1.00	0.00	0.00		
GZ1	0.91	0.09	0.09	0.08	0.07
GZ2	1.00	0.00	0.00		
GZ3	0.87	0.13	0.15		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-3 BAF ในทองแดง

ตัวอย่าง	Soil (mg/kg)	PLANTS (mg/kg)	BAF	เฉลี่ย	sd
c1	75.55	161.50	2.14	2.14	0.00
c2	76.37	162.75	2.13		
c3	75.23	160.87	2.14		
DX1	81.70	108.11	1.32	1.33	0.01
DX2	81.29	108.62	1.34		
DX3	81.55	108.77	1.33		
DY1	83.88	115.18	1.37	1.39	0.01
DY2	83.09	116.19	1.40		
DY3	83.39	115.41	1.38		
DZ1	76.80	97.09	1.26	1.27	0.00
DZ2	76.58	97.10	1.27		
DZ3	76.18	96.32	1.26		
EX1	74.20	99.42	1.34	1.34	0.00
EX2	74.40	99.31	1.33		
EX3	74.29	99.12	1.33		
EY1	74.66	94.83	1.27	1.28	0.01
EY2	74.28	95.63	1.29		
EY3	74.40	95.03	1.28		
EZ1	75.18	140.45	1.87	1.88	0.02
EZ2	75.37	141.69	1.88		
EZ3	74.59	141.79	1.90		
FX1	73.38	99.61	1.36	1.36	0.00
FX2	73.27	99.84	1.36		
FX3	73.79	100.17	1.36		
FY1	75.28	109.93	1.46	1.45	0.01
FY2	76.16	109.53	1.44		
FY3	76.35	110.51	1.45		
FZ1	70.89	123.04	1.74	1.74	0.00
FZ2	70.75	122.89	1.74		
FZ3	71.36	124.31	1.74		
GX1	72.19	92.44	1.28	1.29	0.01
GX2	71.79	92.64	1.29		
GX3	71.39	92.83	1.30		
GY1	74.59	97.42	1.31	1.31	0.01
GY2	74.19	98.37	1.33		
GY3	74.56	97.67	1.31		
GZ1	72.79	104.90	1.44	1.50	0.05
GZ2	72.95	111.46	1.53		
GZ3	72.88	111.75	1.53		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-4 TF ในทองแดง

ตัวอย่าง	seed/total	root/total	seed/root	เฉลี่ย	sd
c1	0.96	0.04	0.04	0.04	0.00
c2	0.96	0.04	0.04		
c3	0.95	0.05	0.05		
DX1	0.92	0.08	0.09	0.08	0.00
DX2	0.93	0.07	0.08		
DX3	0.92	0.08	0.08		
DY1	0.94	0.06	0.06	0.07	0.01
DY2	0.93	0.07	0.07		
DY3	0.94	0.06	0.06		
DZ1	0.92	0.08	0.08	0.09	0.01
DZ2	0.92	0.08	0.09		
DZ3	0.91	0.09	0.09		
EX1	0.93	0.07	0.08	0.09	0.01
EX2	0.90	0.10	0.11		
EX3	0.91	0.09	0.10		
EY1	0.96	0.04	0.05	0.05	0.00
EY2	0.95	0.05	0.05		
EY3	0.95	0.05	0.05		
EZ1	0.90	0.10	0.11	0.10	0.02
EZ2	0.93	0.07	0.08		
EZ3	0.90	0.10	0.11		
FX1	0.83	0.17	0.20	0.21	0.02
FX2	0.81	0.19	0.24		
FX3	0.84	0.16	0.19		
FY1	0.88	0.12	0.14	0.14	0.03
FY2	0.85	0.15	0.17		
FY3	0.90	0.10	0.12		
FZ1	0.88	0.12	0.13	0.13	0.02
FZ2	0.91	0.09	0.10		
FZ3	0.87	0.13	0.15		
GX1	0.91	0.09	0.10	0.11	0.02
GX2	0.89	0.11	0.13		
GX3	0.91	0.09	0.10		
GY1	0.92	0.08	0.09	0.10	0.01
GY2	0.91	0.09	0.10		
GY3	0.90	0.10	0.11		
GZ1	0.93	0.07	0.07	0.10	0.03
GZ2	0.92	0.08	0.09		
GZ3	0.88	0.12	0.13		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-5 BAF ในแคดเมียม

ตัวอย่าง	Soil (mg/kg)	PLANTS (mg/kg)	BAF	เฉลี่ย	sd
c1	2.80	23.75	8.49	8.37	0.47
c2	3.00	23.57	7.86		
c3	2.70	23.67	8.78		
DX1	2.80	19.21	6.86	6.58	0.89
DX2	2.70	15.06	5.58		
DX3	2.50	18.23	7.30		
DY1	5.00	14.29	2.86	3.10	0.42
DY2	4.30	15.44	3.59		
DY3	5.20	14.89	2.86		
DZ1	4.80	13.90	2.90	2.70	0.23
DZ2	4.70	13.00	2.77		
DZ3	5.00	12.23	2.45		
EX1	2.90	10.34	3.56	3.54	0.53
EX2	3.10	9.27	2.99		
EX3	3.70	15.02	4.06		
EY1	3.20	15.32	4.79	5.71	2.15
EY2	3.50	14.58	4.17		
EY3	2.90	23.66	8.16		
EZ1	3.40	19.65	5.78	5.93	0.76
EZ2	3.50	18.35	5.25		
EZ3	3.10	20.91	6.75		
FX1	3.60	9.86	2.74	2.61	0.20
FX2	4.10	9.75	2.38		
FX3	3.90	10.57	2.71		
FY1	3.70	21.06	5.69	5.48	0.19
FY2	3.90	20.76	5.33		
FY3	4.10	22.22	5.43		
FZ1	3.70	10.39	2.81	2.84	0.12
FZ2	3.70	10.08	2.73		
FZ3	3.80	11.28	2.97		
GX1	3.30	18.94	5.74	6.09	1.14
GX2	2.40	17.66	7.36		
GX3	3.30	17.02	5.16		
GY1	3.30	11.49	3.48	3.12	0.37
GY2	2.80	8.80	3.14		
GY3	3.10	8.52	2.75		
GZ1	3.00	12.38	4.13	4.17	0.44
GZ2	3.20	12.04	3.77		
GZ3	3.10	14.35	4.63		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-6 TF ในแคดเมียม

ตัวอย่าง	seed/total	root/total	seed/root	เฉลี่ย	sd
c1	0.92	0.08	0.0875	0.10	0.01
c2	0.90	0.10	0.1120		
c3	0.90	0.10	0.1051		
DX1	0.91	0.09	0.1019	0.09	0.01
DX2	0.92	0.08	0.0830		
DX3	0.91	0.09	0.0988		
DY1	0.94	0.06	0.0584	0.05	0.01
DY2	0.96	0.04	0.0463		
DY3	0.95	0.05	0.0511		
DZ1	0.94	0.06	0.0675	0.06	0.01
DZ2	0.94	0.06	0.0637		
DZ3	0.95	0.05	0.0492		
EX1	0.89	0.11	0.1227	0.10	0.02
EX2	0.93	0.07	0.0776		
EX3	0.91	0.09	0.0937		
EY1	1.02	-0.02	-0.0161	-0.01	0.01
EY2	1.02	-0.02	-0.0215		
EY3	1.00	0.00	0.0048		
EZ1	0.94	0.06	0.0598	0.05	0.01
EZ2	0.95	0.05	0.0497		
EZ3	0.96	0.04	0.0471		
FX1	0.95	0.05	0.0534	0.03	0.03
FX2	0.96	0.04	0.0416		
FX3	1.00	0.00	-0.0002		
FY1	0.91	0.09	0.1003	0.11	0.01
FY2	0.89	0.11	0.1196		
FY3	0.91	0.09	0.1021		
FZ1	0.98	0.02	0.0230	0.03	0.02
FZ2	0.99	0.01	0.0145		
FZ3	0.94	0.06	0.0597		
GX1	0.95	0.05	0.0517	0.04	0.01
GX2	0.98	0.02	0.0232		
GX3	0.97	0.03	0.0327		
GY1	1.02	-0.02	-0.0171	-0.05	0.03
GY2	1.08	-0.08	-0.0759		
GY3	1.06	-0.06	-0.0600		
GZ1	0.90	0.10	0.1140	0.12	0.05
GZ2	0.93	0.07	0.0756		
GZ3	0.85	0.15	0.1785		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-7 BAF ในสังกะสี

ตัวอย่าง	Soil (mg/kg)	PLANTS (mg/kg)	BAF	เฉลี่ย	sd
c1	171.79	911.15	5.30	5.26	0.11
c2	169.86	908.50	5.35		
c3	177.68	912.52	5.14		
DX1	159.00	458.75	2.89	2.77	0.10
DX2	165.97	449.05	2.71		
DX3	163.80	444.69	2.71		
DY1	155.93	354.04	2.27	2.22	0.05
DY2	158.97	344.75	2.17		
DY3	155.97	346.02	2.22		
DZ1	158.00	405.30	2.57	2.59	0.03
DZ2	156.93	410.73	2.62		
DZ3	155.90	404.06	2.59		
EX1	158.00	484.60	3.07	3.28	0.34
EX2	159.00	493.78	3.11		
EX3	159.97	587.60	3.67		
EY1	149.81	425.49	2.84	2.88	0.03
EY2	144.90	420.48	2.90		
EY3	146.00	423.12	2.90		
EZ1	134.91	412.28	3.06	2.96	0.08
EZ2	141.87	414.87	2.92		
EZ3	140.94	409.00	2.90		
FX1	137.91	420.75	3.05	3.07	0.09
FX2	140.87	422.87	3.00		
FX3	134.97	427.48	3.17		
FY1	163.93	426.72	2.60	2.55	0.06
FY2	164.83	421.23	2.56		
FY3	168.76	420.32	2.49		
FZ1	173.97	446.75	2.57	2.55	0.03
FZ2	175.76	442.02	2.51		
FZ3	170.79	437.38	2.56		
GX1	155.93	533.72	3.42	3.27	0.16
GX2	156.97	512.94	3.27		
GX3	162.93	507.15	3.11		
GY1	146.94	451.23	3.07	3.01	0.05
GY2	143.94	427.66	2.97		
GY3	142.84	426.89	2.99		
GZ1	151.97	408.73	2.69	2.70	0.05
GZ2	147.77	406.59	2.75		
GZ3	153.90	408.79	2.66		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ-8 TF ในสังกะสี

ตัวอย่าง	seed/total	root/total	seed/root	เฉลี่ย	sd
c1	0.89	0.11	0.13	0.13	0.01
c2	0.89	0.11	0.13		
c3	0.88	0.12	0.14		
DX1	0.81	0.19	0.23	0.21	0.02
DX2	0.84	0.16	0.19		
DX3	0.83	0.17	0.20		
DY1	0.90	0.10	0.11	0.11	0.02
DY2	0.88	0.12	0.13		
DY3	0.91	0.09	0.10		
DZ1	0.80	0.20	0.26	0.27	0.02
DZ2	0.79	0.21	0.27		
DZ3	0.78	0.22	0.29		
EX1	0.95	0.05	0.05	0.05	0.01
EX2	0.94	0.06	0.06		
EX3	0.95	0.05	0.05		
EY1	0.88	0.12	0.13	0.14	0.01
EY2	0.87	0.13	0.15		
EY3	0.87	0.13	0.15		
EZ1	0.85	0.15	0.18	0.16	0.03
EZ2	0.89	0.11	0.12		
EZ3	0.85	0.15	0.18		
FX1	0.82	0.18	0.22	0.22	0.02
FX2	0.80	0.20	0.25		
FX3	0.83	0.17	0.20		
FY1	0.87	0.13	0.15	0.16	0.04
FY2	0.83	0.17	0.20		
FY3	0.88	0.12	0.13		
FZ1	0.87	0.13	0.15	0.15	0.03
FZ2	0.89	0.11	0.12		
FZ3	0.85	0.15	0.17		
GX1	0.79	0.21	0.27	0.32	0.05
GX2	0.73	0.27	0.38		
GX3	0.77	0.23	0.30		
GY1	0.78	0.22	0.28	0.34	0.05
GY2	0.74	0.26	0.36		
GY3	0.72	0.28	0.38		
GZ1	0.92	0.08	0.09	0.12	0.04
GZ2	0.90	0.10	0.11		
GZ3	0.86	0.14	0.16		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ
การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติใช้ One way ANOVA ของโปรแกรม spss

ตารางที่ ฉ-1 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของปริมาณตะกั่วในเมล็ดถั่วเหลือง

Duncan[a]

trt	N	Subset for alpha = 0.05
		1
GY	3	1.00
EZ	3	2.12
DZ	3	3.68
FZ	3	3.77
DY	3	3.79
EY	3	3.91
GZ	3	4.13
FY	3	4.35
FX	3	4.50
DX	3	4.55
GX	3	5.06
EX	3	5.18
C	3	5.36
Sig.		.099

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-2 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของปริมาณทองแดงในเมล็ดถั่วเหลือง

Duncan[a]

trt	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
EY	3	10.06					
GZ	3		14.48				
DY	3		14.52				
DZ	3			16.35			
GX	3			16.57	16.57		
FY	3			16.62	16.62		
EZ	3			16.73	16.73		
FX	3				16.77		
FZ	3				16.95		
GY	3					17.71	
DX	3					17.96	
EX	3						18.55
C	3						18.57
Sig.		1.000	.807	.063	.075	.181	.932

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-3 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของปริมาณแคลเซียมในเมล็ดถั่วเหลือง

Duncan[a]

		Subset for alpha = 0.05				
trt	N	1	2	3	4	5
EY	3	.00				
GY	3	.00				
FX	3	.36	.36			
FZ	3	.39	.39			
GX	3		.62	.62		
DY	3		.83	.83		
DZ	3		.86	.86		
EX	3			.99		
EZ	3			1.09		
DX	3				1.56	
GZ	3				1.92	1.92
FY	3				2.03	2.03
C	3					2.19
Sig.		.117	.055	.074	.060	.277

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-4 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของปริมาณสังกะสีในเมล็ดถั่วเหลือง

Duncan[a]

trt	N	Subset for alpha = 0.05									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EX	3	60.42									
GZ	3		65.38								
FZ	3			70.66							
DY	3			71.56							
FY	3			73.15	73.15						
EZ	3			74.28	74.28						
FX	3				75.79						
EY	3					109.21					
DX	3						150.97				
DZ	3							158.46			
GY	3								191.31		
GX	3									206.26	
C	3										257.47
Sig.		1.000	1.000	.073	.175	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช

สมดุลมวล (Mass balance)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตารางที่ ช-1 ข้อมูลสมดุลมวล (Mass balance) ของตะกั่ว

ตัวอย่าง	Pb ราก+ต้น mg/kg	น.น. ราก+ต้น g/pot	นน.ราก+ต้น kg/pot	Pb ในราก+ต้น mg/pot	Pb เมล็ด mg/kg	น.น.เมล็ด g/pot	นน.เมล็ด kg/pot	Pb เมล็ด mg/pot	Pb ในพืช mg/pot	Pb รวมดิน หลัง+พืช	Pb ในดิน ก่อน	%ที่หาย	เฉลี่ย%	sd
c1	72.10	22.30	0.02	1.61	10.29	7.34	0.01	0.08	1.68	164.78	177.71	7.28	6.21	1.38
c2	71.64	19.00	0.02	1.36	10.04	6.15	0.01	0.06	1.42	169.45	177.71	4.65		
c3	77.98	15.41	0.02	1.20	8.34	5.69	0.01	0.05	1.25	165.80	177.71	6.70		
DX1	66.48	17.05	0.02	1.13	3.20	7.57	0.01	0.02	1.16	186.36	177.97	-4.71	-5.71	1.56
DX2	64.64	20.45	0.02	1.32	5.49	8.32	0.01	0.05	1.37	191.35	177.97	-7.52		
DX3	90.41	18.69	0.02	1.69	4.99	7.85	0.01	0.04	1.73	186.71	177.97	-4.91		
DY1	55.98	16.45	0.02	0.92	0.00	7.12	0.01	0.00	0.92	172.29	178.23	3.34	-0.61	4.23
DY2	61.89	17.15	0.02	1.06	3.98	8.96	0.01	0.04	1.10	178.38	178.23	-0.08		
DY3	52.36	16.32	0.02	0.85	5.40	6.70	0.01	0.04	0.89	187.27	178.23	-5.07		
DZ1	57.29	18.61	0.02	1.07	5.60	7.74	0.01	0.04	1.11	161.51	178.76	9.65	6.97	2.58
DZ2	55.87	19.32	0.02	1.08	3.39	8.56	0.01	0.03	1.11	166.67	178.76	6.76		
DZ3	72.63	19.89	0.02	1.44	2.06	9.12	0.01	0.02	1.46	170.71	178.76	4.50		
EX1	45.82	17.91	0.02	0.82	5.18	6.21	0.01	0.03	0.85	156.85	177.80	11.78	11.42	0.31
EX2	46.57	16.58	0.02	0.77	4.38	7.56	0.01	0.03	0.81	157.71	177.80	11.30		
EX3	51.31	18.69	0.02	0.96	5.99	7.99	0.01	0.05	1.01	157.89	177.80	11.20		
EY1	56.34	19.65	0.02	1.11	1.78	7.75	0.01	0.01	1.12	166.02	177.88	6.67	9.34	3.30
EY2	59.98	18.38	0.02	1.10	3.38	8.21	0.01	0.03	1.13	163.08	177.88	8.32		
EY3	54.67	18.12	0.02	0.99	0.00	8.12	0.01	0.00	0.99	154.69	177.88	13.04		
EZ1	61.07	18.00	0.02	1.10	6.45	15.23	0.02	0.10	1.20	170.24	178.05	4.38	6.59	1.97
EZ2	56.94	17.45	0.02	0.99	5.98	10.32	0.01	0.06	1.06	163.49	178.05	8.18		
EZ3	58.74	21.36	0.02	1.25	0.00	18.21	0.02	0.00	1.25	165.22	178.05	7.21		

ตารางที่ ช-1 (ต่อ) ข้อมูลสมดุลมวล (Mass balance) ของตะกั่ว

ตัวอย่าง	Pb ราก+ต้น mg/kg	น.น. ราก+ต้น g/pot	นน.ราก+ต้น kg/pot	Pb ในราก+ต้น mg/pot	Pb เมล็ด mg/kg	น.น.เมล็ด g/pot	นน.เมล็ด kg/pot	Pb เมล็ด mg/pot	Pb ในพืช mg/pot	Pb รวมดินหลัง+พืช	Pb ในดินก่อน	%ที่หาย	เฉลี่ย%	sd
FX1	56.24	20.05	0.02	1.13	0.00	20.21	0.02	0.00	1.13	157.28	177.88	11.58	9.36	2.97
FX2	53.27	21.69	0.02	1.16	7.16	25.24	0.03	0.18	1.34	159.17	177.88	10.52		
FX3	55.08	19.14	0.02	1.05	4.88	18.50	0.02	0.09	1.14	167.23	177.88	5.99		
FY1	43.25	16.49	0.02	0.71	3.29	12.48	0.01	0.04	0.75	163.92	178.06	7.94	5.59	5.65
FY2	45.21	15.32	0.02	0.69	4.19	15.22	0.02	0.06	0.76	179.56	178.06	-0.85		
FY3	38.07	17.22	0.02	0.66	5.58	11.03	0.01	0.06	0.72	160.80	178.06	9.69		
FZ1	58.16	21.84	0.02	1.27	6.08	18.27	0.02	0.11	1.38	143.37	178.40	19.64	17.27	2.34
FZ2	55.34	22.87	0.02	1.27	4.28	15.01	0.02	0.06	1.33	147.72	178.40	17.20		
FZ3	52.54	19.11	0.02	1.00	0.00	17.74	0.02	0.00	1.00	151.71	178.40	14.96		
GX1	45.74	15.81	0.02	0.72	5.77	7.02	0.01	0.04	0.76	164.93	177.91	7.30	12.47	4.52
GX2	49.01	16.55	0.02	0.81	8.17	9.63	0.01	0.08	0.89	152.17	177.91	14.47		
GX3	37.29	18.33	0.02	0.68	0.00	8.57	0.01	0.00	0.68	150.05	177.91	15.66		
GY1	39.51	18.16	0.02	0.72	0.00	7.15	0.01	0.00	0.72	154.19	178.11	13.43	11.99	1.33
GY2	56.39	19.58	0.02	1.10	0.00	9.13	0.01	0.00	1.10	157.27	178.11	11.70		
GY3	36.55	22.33	0.02	0.82	0.00	11.25	0.01	0.00	0.82	158.83	178.11	10.82		
GZ1	33.21	22.43	0.02	0.74	6.65	10.55	0.01	0.07	0.82	150.90	178.51	15.47	17.85	2.12
GZ2	31.47	23.21	0.02	0.73	0.00	14.28	0.01	0.00	0.73	143.63	178.51	19.54		
GZ3	31.94	18.21	0.02	0.58	5.30	16.11	0.02	0.09	0.67	145.42	178.51	18.54		
เฉลี่ยทุกอัตราส่วน													8.37	2.64

ตารางที่ ช-2 ข้อมูลสมดุลมวล (Mass balance) ของทองแดง

ตัวอย่าง	Cu ราก+ต้น mg/kg	น.น. ราก+ต้น g/pot	นน.ราก+ต้น kg/pot	Cu ในราก+ต้น mg/pot	Cu เมล็ด mg/kg	น.น.เมล็ด g/pot	นน.เมล็ด kg/pot	นน.ราก+เมล็ด/pot	Cu เมล็ด mg/pot	Cu ในพืช mg/pot	Cu รวมดินหลัง+พืช	Cu ในดินก่อน	%ที่หาย	เฉลี่ย %	sd
c1	143.31	22.30	0.02	3.20	18.20	7.34	0.01	0.03	0.13	3.33	88.88	106.96	16.90	17.22	0.84
c2	143.89	19.00	0.02	2.73	18.86	6.15	0.01	0.03	0.12	2.85	89.22	106.96	16.59		
c3	142.21	15.41	0.02	2.19	18.66	5.69	0.01	0.02	0.11	2.30	87.53	106.96	18.17		
DX1	90.21	17.05	0.02	1.54	17.90	7.57	0.01	0.02	0.14	1.67	93.37	106.97	12.71	12.73	0.05
DX2	90.63	20.45	0.02	1.85	17.99	8.32	0.01	0.03	0.15	2.00	93.29	106.97	12.79		
DX3	90.78	18.69	0.02	1.70	17.99	7.85	0.01	0.03	0.14	1.84	93.39	106.97	12.70		
DY1	100.88	16.45	0.02	1.66	14.30	7.12	0.01	0.02	0.10	1.76	95.64	106.99	10.60	10.97	0.33
DY2	101.61	17.15	0.02	1.74	14.59	8.96	0.01	0.03	0.13	1.87	94.96	106.99	11.24		
DY3	100.71	16.32	0.02	1.64	14.70	6.70	0.01	0.02	0.10	1.74	95.13	106.99	11.08		
DZ1	80.89	18.61	0.02	1.51	16.20	7.74	0.01	0.03	0.13	1.63	88.43	107.01	17.36	17.57	0.25
DZ2	80.51	19.32	0.02	1.56	16.59	8.56	0.01	0.03	0.14	1.70	88.28	107.01	17.50		
DZ3	80.05	19.89	0.02	1.59	16.27	9.12	0.01	0.03	0.15	1.74	87.92	107.01	17.84		
EX1	80.93	17.91	0.02	1.45	18.49	6.21	0.01	0.02	0.11	1.56	85.76	107.00	19.84	19.75	0.09
EX2	80.63	16.58	0.02	1.34	18.69	7.56	0.01	0.02	0.14	1.48	85.88	107.00	19.74		
EX3	80.63	18.69	0.02	1.51	18.49	7.99	0.01	0.03	0.15	1.65	85.95	107.00	19.67		
EY1	84.84	19.65	0.02	1.67	9.99	7.75	0.01	0.03	0.08	1.74	86.40	107.03	19.28	19.54	0.23
EY2	85.63	18.38	0.02	1.57	10.00	8.21	0.01	0.03	0.08	1.66	85.93	107.03	19.71		
EY3	84.83	18.12	0.02	1.54	10.20	8.12	0.01	0.03	0.08	1.62	86.02	107.03	19.63		
EZ1	123.78	18.00	0.02	2.23	16.67	15.23	0.02	0.03	0.25	2.48	87.66	107.10	18.15	18.16	0.08

ตารางที่ ช-2 (ต่อ) ข้อมูลสมดุลมวล (Mass balance) ของทองแดง

ตัวอย่าง	Cu ราก+ต้น mg/kg	น.น. ราก+ต้น g/pot	นน.ราก+ต้น kg/pot	Cu ในราก+ต้น mg/pot	Cu เมล็ด mg/kg	น.น.เมล็ด g/pot	นน.เมล็ด kg/pot	นน.ราก+เมล็ด/pot	Cu เมล็ด mg/pot	Cu ในพืช mg/pot	Cu รวมดิน หลัง+พืช	Cu ในดิน ก่อน	%ที่หาย	เฉลี่ย %	sd
EZ2	124.80	17.45	0.02	2.18	16.88	10.32	0.01	0.03	0.17	2.35	87.72	107.10	18.09		
EZ3	125.13	21.36	0.02	2.67	16.66	18.21	0.02	0.04	0.30	2.98	87.56	107.10	18.24		
FX1	82.94	20.05	0.02	1.66	16.67	20.21	0.02	0.04	0.34	2.00	85.38	106.98	20.20	20.06	0.15
FX2	82.97	21.69	0.02	1.80	16.88	25.24	0.03	0.05	0.43	2.23	85.50	106.98	20.09		
FX3	83.38	19.14	0.02	1.60	16.79	18.50	0.02	0.04	0.31	1.91	85.70	106.98	19.90		
FY1	93.24	16.49	0.02	1.54	16.69	12.48	0.01	0.03	0.21	1.75	87.03	107.01	18.67	18.07	0.54
FY2	93.23	15.32	0.02	1.43	16.29	15.22	0.02	0.03	0.25	1.68	87.84	107.01	17.91		
FY3	93.62	17.22	0.02	1.61	16.89	11.03	0.01	0.03	0.19	1.80	88.15	107.01	17.63		
FZ1	106.05	21.84	0.02	2.32	16.99	18.27	0.02	0.04	0.31	2.63	83.52	107.06	21.99	21.95	0.13
FZ2	106.40	22.87	0.02	2.43	16.49	15.01	0.02	0.04	0.25	2.68	83.43	107.06	22.07		
FZ3	106.94	19.11	0.02	2.04	17.38	17.74	0.02	0.04	0.31	2.35	83.71	107.06	21.81		
GX1	75.96	15.81	0.02	1.20	16.48	7.02	0.01	0.02	0.12	1.32	83.50	106.98	21.95	22.22	0.27
GX2	75.95	16.55	0.02	1.26	16.68	9.63	0.01	0.03	0.16	1.42	83.21	106.98	22.22		
GX3	76.26	18.33	0.02	1.40	16.57	8.57	0.01	0.03	0.14	1.54	82.93	106.98	22.49		
GY1	79.65	18.16	0.02	1.45	17.77	7.15	0.01	0.03	0.13	1.57	86.16	107.00	19.48	19.43	0.29
GY2	80.58	19.58	0.02	1.58	17.79	9.13	0.01	0.03	0.16	1.74	85.93	107.00	19.70		
GY3	80.09	22.33	0.02	1.79	17.58	11.25	0.01	0.03	0.20	1.99	86.55	107.00	19.11		
GZ1	90.73	22.43	0.02	2.04	14.17	10.55	0.01	0.03	0.15	2.18	84.98	107.04	20.61	20.51	0.26
GZ2	96.89	23.21	0.02	2.25	14.58	14.28	0.01	0.04	0.21	2.46	85.41	107.04	20.21		
GZ3	97.05	18.21	0.02	1.77	14.70	16.11	0.02	0.03	0.24	2.00	84.88	107.04	20.70		
เฉลี่ยทุกอัตราส่วน														18.32	0.27

ตารางที่ ช-3 ข้อมูลสมดุลมวล (Mass balance) ของแคดเมียม

ตัวอย่าง	Cd ราก+ต้น mg/kg	น.น. ราก+ต้น g/pot	นน.ราก+ต้น kg/pot	Cd ในราก+ต้น mg/pot	Cd เมล็ด mg/kg	น.น.เมล็ด g/pot	นน.เมล็ด kg/pot	Cd เมล็ด mg/pot	Cd ในพืช mg/pot	Cd รวมดิน หลัง+พืช	Cd ในดิน ก่อน	%ที่หาย	เฉลี่ย%	sd
c1	21.45	22.30	0.02	0.48	18.20	2.30	0.002	0.04	0.52	4.32	5.03	14.16	14.97	3.83
c2	21.18	19.00	0.02	0.40	18.86	2.39	0.002	0.05	0.45	4.45	5.03	11.61		
c3	21.78	15.41	0.02	0.34	18.66	1.89	0.002	0.04	0.37	4.07	5.03	19.13		
DX1	17.51	17.05	0.02	0.30	17.90	1.70	0.002	0.03	0.33	4.13	5.09	18.89	21.62	2.87
DX2	13.76	20.45	0.02	0.28	17.99	1.30	0.001	0.02	0.30	4.00	5.09	21.34		
DX3	16.53	18.69	0.02	0.31	17.99	1.70	0.002	0.03	0.34	3.84	5.09	24.62		
DY1	13.39	16.45	0.02	0.22	14.30	0.90	0.001	0.01	0.23	6.23	5.15	-20.97	-17.98	8.91
DY2	14.64	17.15	0.02	0.25	14.59	0.80	0.001	0.01	0.26	5.56	5.15	-7.96		
DY3	14.09	16.32	0.02	0.23	14.70	0.80	0.001	0.01	0.24	6.44	5.15	-25.02		
DZ1	12.90	18.61	0.02	0.24	16.20	1.00	0.001	0.02	0.26	6.06	5.27	-14.83	-15.30	2.79
DZ2	12.10	19.32	0.02	0.23	16.59	0.90	0.001	0.01	0.25	5.95	5.27	-12.77		
DZ3	11.54	19.89	0.02	0.23	16.27	0.69	0.001	0.01	0.24	6.24	5.27	-18.30		
EX1	9.24	17.91	0.02	0.17	18.49	1.10	0.001	0.02	0.19	4.09	5.04	19.00	11.97	9.42
EX2	8.68	16.58	0.02	0.14	18.69	0.60	0.001	0.01	0.16	4.26	5.04	15.64		
EX3	13.72	18.69	0.02	0.26	18.49	1.30	0.001	0.02	0.28	4.98	5.04	1.27		
EY1	15.82	19.65	0.02	0.31	9.99	-0.50	-0.001	-0.01	0.31	4.50	5.06	10.96	10.36	4.43
EY2	15.18	18.38	0.02	0.28	10.00	-0.60	-0.001	-0.01	0.27	4.77	5.06	5.66		
EY3	23.46	18.12	0.02	0.43	10.20	0.20	0.000	0.00	0.43	4.33	5.06	14.45		
EZ1	18.46	18.00	0.02	0.33	16.67	1.19	0.001	0.02	0.35	4.75	5.09	6.59	7.53	2.85

ตารางที่ ช-3 (ต่อ) ข้อมูลสมดุลมวล (Mass balance) ของแคดเมียม

ตัวอย่าง	Cd ราก+ต้น mg/kg	น.น. ราก+ต้น g/pot	นน.ราก+ต้น kg/pot	Cd ในราก+ต้น mg/pot	Cd เมล็ด mg/kg	น.น.เมล็ด g/pot	นน.เมล็ด kg/pot	Cd เมล็ด mg/pot	Cd ในพืช mg/pot	Cd รวมดิน หลัง+พืช	Cd ในดิน ก่อน	%ที่หาย	เฉลี่ย%	sd
EZ2	17.46	17.45	0.02	0.30	16.88	0.90	0.001	0.02	0.32	4.82	5.09	5.27		
EZ3	19.72	21.36	0.02	0.42	16.66	1.19	0.001	0.02	0.44	4.54	5.09	10.73		
FX1	9.27	20.05	0.02	0.19	16.67	0.59	0.001	0.01	0.20	4.79	5.07	5.39	-0.01	5.09
FX2	9.26	21.69	0.02	0.20	16.88	0.50	0.000	0.01	0.21	5.31	5.07	-4.73		
FX3	10.57	19.14	0.02	0.20	16.79	0.00	0.000	0.00	0.20	5.10	5.07	-0.68		
FY1	19.16	16.49	0.02	0.32	16.69	1.90	0.002	0.03	0.35	5.05	5.11	1.14	-2.79	4.26
FY2	18.66	15.32	0.02	0.29	16.29	2.10	0.002	0.03	0.32	5.22	5.11	-2.21		
FY3	20.13	17.22	0.02	0.35	16.89	2.10	0.002	0.04	0.38	5.48	5.11	-7.32		
FZ1	10.09	21.84	0.02	0.22	16.99	0.30	0.000	0.01	0.23	4.93	5.18	4.92	4.36	0.96
FZ2	9.89	22.87	0.02	0.23	16.49	0.20	0.000	0.00	0.23	4.93	5.18	4.90		
FZ3	10.59	19.11	0.02	0.20	17.38	0.70	0.001	0.01	0.21	5.01	5.18	3.25		
GX1	18.04	15.81	0.02	0.29	16.48	0.90	0.001	0.01	0.30	4.60	5.07	9.37	15.26	10.38
GX2	17.26	16.55	0.02	0.29	16.68	0.40	0.000	0.01	0.29	3.69	5.07	27.25		
GX3	16.43	18.33	0.02	0.30	16.57	0.59	0.001	0.01	0.31	4.61	5.07	9.16		
GY1	11.69	18.16	0.02	0.21	17.77	-0.20	0.000	0.00	0.21	4.51	5.12	11.95	16.84	5.26
GY2	9.60	19.58	0.02	0.19	17.79	-0.80	-0.001	-0.01	0.17	3.97	5.12	22.40		
GY3	9.22	22.33	0.02	0.21	17.58	-0.70	-0.001	-0.01	0.19	4.29	5.12	16.18		
GZ1	10.49	22.43	0.02	0.24	14.17	1.89	0.002	0.03	0.26	4.26	5.21	18.18	16.30	1.96
GZ2	10.75	23.21	0.02	0.25	14.58	1.29	0.001	0.02	0.27	4.47	5.21	14.26		
GZ3	11.75	18.21	0.02	0.21	14.70	2.60	0.003	0.04	0.25	4.35	5.21	16.46		
	เฉลี่ยทุกอัตราส่วน												6.39	4.85

ตารางที่ ช-4 ข้อมูลสมดุลมวล (Mass balance) ของสังกะสี

ตัวอย่าง	Zn ราก+ต้น mg/kg	น.น. ราก+ต้น g/pot	นน.ราก+ต้น kg/pot	Zn ในราก+ต้น mg/pot	Zn เมล็ด mg/kg	น.น.เมล็ด g/pot	นน.เมล็ด kg/pot	Zn เมล็ด mg/pot	Zn ในพืช mg/pot	Zn รวมดิน หลัง+พืช	Zn ในดิน ก่อน	%ที่หาย	เฉลี่ย%	sd
c1	664.42	22.30	0.02	14.82	257.93	7.34	0.01	1.89	16.71	208.50	194.44	-7.23	-6.62	1.48
c2	662.43	19.00	0.02	12.59	257.27	6.15	0.01	1.58	14.17	204.03	194.44	-4.93		
c3	666.48	15.41	0.02	10.27	257.23	5.69	0.01	1.46	11.73	209.42	194.44	-7.70		
DX1	310.95	17.05	0.02	5.30	159.00	7.57	0.01	1.20	6.51	185.51	194.47	4.61	2.33	2.11
DX2	313.33	20.45	0.02	6.41	146.92	8.32	0.01	1.22	7.63	193.60	194.47	0.45		
DX3	308.02	18.69	0.02	5.76	147.87	7.85	0.01	1.16	6.92	190.71	194.47	1.93		
DY1	293.25	16.45	0.02	4.82	71.99	7.12	0.01	0.51	5.34	181.27	194.51	6.81	6.28	0.98
DY2	284.32	17.15	0.02	4.88	71.63	8.96	0.01	0.64	5.52	184.48	194.51	5.15		
DY3	286.13	16.32	0.02	4.67	71.09	6.70	0.01	0.48	5.15	181.11	194.51	6.89		
DZ1	257.52	18.61	0.02	4.79	158.97	7.74	0.01	1.23	6.02	184.02	194.58	5.42	5.81	0.41
DZ2	262.06	19.32	0.02	5.06	159.87	8.56	0.01	1.37	6.43	183.37	194.58	5.76		
DZ3	254.71	19.89	0.02	5.07	160.54	9.12	0.01	1.46	6.53	182.43	194.58	6.24		
EX1	435.15	17.91	0.02	7.79	60.66	6.21	0.01	0.38	8.17	186.17	194.53	4.30	3.44	1.20
EX2	444.53	16.58	0.02	7.37	60.45	7.56	0.01	0.46	7.83	186.83	194.53	3.96		
EX3	538.62	18.69	0.02	10.07	60.18	7.99	0.01	0.48	10.55	190.51	194.53	2.07		
EY1	327.71	19.65	0.02	6.44	108.98	7.75	0.01	0.84	7.28	177.09	194.62	9.01	10.67	1.46
EY2	322.17	18.38	0.02	5.92	109.51	8.21	0.01	0.90	6.82	171.72	194.62	11.77		
EY3	325.17	18.12	0.02	5.89	109.15	8.12	0.01	0.89	6.78	172.78	194.62	11.22		
EZ1	348.35	18.00	0.02	6.27	75.14	15.23	0.02	1.14	7.41	162.32	194.81	16.68	14.31	2.06

ตารางที่ ช-4 (ต่อ) ข้อมูลสมดุลมวล (Mass balance) ของสังกะสี

ตัวอย่าง	Zn ราก+ต้น mg/kg	น.น. ราก+ต้น g/pot	นน.ราก+ต้น kg/pot	Zn ในราก+ต้น mg/pot	Zn เมล็ด mg/kg	น.น.เมล็ด g/pot	นน.เมล็ด kg/pot	Zn เมล็ด mg/pot	Zn ในพืช mg/pot	Zn รวมดิน หลัง+พืช	Zn ในดิน ก่อน	%ที่หาย	เฉลี่ย%	sd
EZ2	351.84	17.45	0.02	6.14	74.22	10.32	0.01	0.77	6.91	168.78	194.81	13.36		
EZ3	346.69	21.36	0.02	7.41	73.51	18.21	0.02	1.34	8.74	169.68	194.81	12.90		
FX1	355.88	20.05	0.02	7.14	76.07	20.21	0.02	1.54	8.67	166.58	194.50	14.36	14.23	1.86
FX2	358.49	21.69	0.02	7.78	75.58	25.24	0.03	1.91	9.68	170.56	194.50	12.31		
FX3	362.95	19.14	0.02	6.95	75.73	18.50	0.02	1.40	8.35	163.32	194.50	16.03		
FY1	364.66	16.49	0.02	6.01	73.27	12.48	0.01	0.91	6.93	190.86	194.57	1.90	0.97	1.37
FY2	359.05	15.32	0.02	5.50	73.37	15.22	0.02	1.12	6.62	191.45	194.57	1.60		
FY3	358.69	17.22	0.02	6.18	72.83	11.03	0.01	0.80	6.98	195.74	194.57	-0.60		
FZ1	386.70	21.84	0.02	8.45	71.25	18.27	0.02	1.30	9.75	203.71	194.69	-4.63	-4.19	1.66
FZ2	383.47	22.87	0.02	8.77	69.75	15.01	0.02	1.05	9.82	205.57	194.69	-5.59		
FZ3	377.59	19.11	0.02	7.22	70.99	17.74	0.02	1.26	8.48	199.27	194.69	-2.35		
GX1	337.29	15.81	0.02	5.33	207.62	7.02	0.01	1.46	6.79	182.72	194.49	6.05	4.47	2.10
GX2	317.45	16.55	0.02	5.25	206.68	9.63	0.01	1.99	7.24	184.21	194.49	5.29		
GX3	313.85	18.33	0.02	5.75	204.50	8.57	0.01	1.75	7.51	190.44	194.49	2.08		
GY1	268.94	18.16	0.02	4.88	193.49	7.15	0.01	1.38	6.27	173.20	194.55	10.97	11.89	0.79
GY2	248.04	19.58	0.02	4.86	190.82	9.13	0.01	1.74	6.60	170.54	194.55	12.34		
GY3	248.45	22.33	0.02	5.55	189.64	11.25	0.01	2.13	7.68	170.52	194.55	12.35		
GZ1	354.56	22.43	0.02	7.95	65.37	10.55	0.01	0.69	8.64	180.61	194.65	7.21	7.71	1.24
GZ2	352.42	23.21	0.02	8.18	65.38	14.28	0.01	0.93	9.11	176.89	194.65	9.13		
GZ3	354.60	18.21	0.02	6.46	65.39	16.11	0.02	1.05	7.51	181.41	194.65	6.80		
	เฉลี่ยทุกอัตราส่วน												5.48	1.44

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวธาริณี ขามเกาะ
วัน เดือน ปีเกิด	17 ธันวาคม 2534
ที่อยู่ปัจจุบัน	71 ม.2 ต.บ้านแลง อ.เมือง จ.ระยอง 21000
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาพืชสวน คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้