# ผลของการปรับปรุงดินต่อการสะสมของปริมาณโลหะหนักในข้าวและดินนา

# EFFECT OF SOIL AMENDMENT ON HEAVY METALS ACCUMULATION IN RICE AND PADDY SOIL

กฤตยา กระทุ่มเขตร์
KITTAYA KRATUMKET

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2561
KMITL-2018-SC-M-016-041

# ผลของการปรับปรุงดินต่อการสะสมของปริมาณโลหะหนักในข้าวและดินนา

# EFFECT OF SOIL AMENDMENT ON HEAVY METALS ACCUMULATION IN RICE AND PADDY SOIL

กฤตยา กระทุ่มเขตร์
KITTAYA KRATUMKET

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2561
KMITL-2018-SC-M-016-041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# EFFECT OF SOIL AMENDMENT ON HEAVY METALS ACCUMULATION IN RICE AND PADDY SOIL

KITTAYA KRATUMKET

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

DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

YEAR 2018
KMITL-2018-SC-M-016-041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2018
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิทยาศาสตร์**
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** ผลของการปรับปรุงดินต่อการสะสมของปริมาณโลหะหนักในข้าวและดินนา
Effect of soil amendment on heavy metals accumulation in rice and paddy soil

**ชื่อนักศึกษา** นางสาวกฤตยา กระทุ่มเขตร์
**รหัสประจำตัว** 56605036
**ปริญญา** วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม)
**ภาควิชา** เคมี
**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | ลายมือชื่อ |
|---|---|
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์<br>ประธานกรรมการ | |
| ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์<br>กรรมการ | |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์<br>กรรมการ | |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์<br>กรรมการ | |

**วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ** วันจันทร์ที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13.30-16.30 น.
**สถานที่สอบ** ณ ห้อง 309 อาคารพระจอมเกล้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

**คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว**

**(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ้งชัด)**
**คณบดีคณะวิทยาศาสตร์**

**วันที่** 20 **เดือน** ก.ค. **พ.ศ.** 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** ผลของการปรับปรุงดินต่อการสะสมของปริมาณโลหะหนักในข้าวและดินนา
**ชื่อนักศึกษา** นางสาวกฤตยา กระทุ่มเขตร์
**รหัสประจำตัว** 56605036
**ปริญญา** วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
**ภาควิชา** เคมี
**พ.ศ.** 2561
**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์** ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการปรับปรุงดินที่มีต่อการสะสมของปริมาณโลหะหนักในข้าวและดินนา ทำการสังเคราะห์ดินปนเปื้อนโลหะหนักคือ แคดเมียม 1 mg/kg ตะกั่ว 150 mg/kg สังกะสี 150 mg/kg และทองแดง 100 mg/kg เติมสารปรับปรุงดินที่มีส่วนผสมของหินปูนและซีพิโอไลท์ อัตราส่วน 1:0, 0:1, 1:1 และ 2:1 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก ลงในดินในปริมาณ 0.2%, 0.4% และ 0.8% ตามลำดับ ปลูกข้าวสายพันธุ์ปทุมธานี 1 ลงในดินผสม เป็นระยะเวลา 120 วัน ทำการศึกษาสมบัติทางเคมีของดินและดินผสมสารปรับปรุงทั้งก่อนและหลังการปลูก ดินเป็นชนิดดินเหนียวปนทราย มีความเป็นกรดสูง (pH<4.5) มีอินทรียวัตถุ (OM) ในระดับสูง ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) สูง จัดว่าดินมีความอุดมสมบูรณ์สูง ศึกษารูปฟอร์มของโลหะหนักในดินทั้งก่อนและหลังการปลูกข้าวโดยใช้วิธีการสกัดลำดับขั้น หลังเก็บเกี่ยวทำการศึกษาปริมาณโลหะหนักในเมล็ด ลำต้นรวมกับใบ และราก ผลการทดลองพบว่าเมื่อไม่เติมสารปรับปรุงดิน ต้นข้าวจะไม่สามารถอยู่รอดได้เนื่องจากสภาวะดินที่เป็นกรดและมีปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักสูง และพบว่าปริมาณโลหะหนัก (Cd, Pb, Zn และ Cu) ในเมล็ดข้าวที่ปลูกในดินผสมหินปูนต่อซีพิโอไลท์ที่อัตราส่วน 2:1 ที่ความเข้มข้น 0.4% มีค่าไม่เกินมาตรฐานอาหาร ผลการสกัดลำดับขั้นแสดงให้เห็นว่ารูปฟอร์มส่วนใหญ่ของตะกั่ว สังกะสี และทองแดงจะอยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (F4) ส่วนแคดเมียมจะอยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงกับคาร์บอเนต (F3) ในดินก่อนปลูกมีโลหะหนักรูปฟอร์มที่ไม่เสถียร (F1-F3) มากกว่าในดินหลังปลูก ข้าวสามารถดูดแคดเมียมได้มากที่สุด รองลงมาคือ ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง ตามลำดับ (Cd>Pb>Zn>Cu) แคดเมียมและตะกั่วมีความเสี่ยงสูงมากที่จะเคลื่อนย้ายสู่สิ่งมีชีวิต แต่สังกะสีและทองแดงมีความเสี่ยงต่ำกว่า แคดเมียมมีการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากรากขึ้นสู่ส่วนเหนือดินมากที่สุด รองลงมาคือ ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว (Cd>Cu>Zn>Pb) ตามลำดับ

**คำสำคัญ :** การปรับปรุงดิน, ข้าว, ดินนา, โลหะหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|---|
| **Thesis Title** | Effect of soil amendment on heavy metals accumulation in rice and paddy soil |
| **Student Name** | Ms. Kittaya Kratumket |
| **Student ID** | 56605036 |
| **Degree** | Master of Science (Environmental Chemistry) |
| **Department** | Chemistry |
| **Year** | 2018 |
| **Thesis Advisor** | Asst. Prof. Dr. Chompoonut Chaiyaraksa |

## ABSTRACT

This research was to study the effect of soil amendment on heavy metals accumulation in rice and paddy soil. The soil was synthesized to contaminate 1 mg/kg of cadmium, 150 mg/kg of lead, 150 mg/kg of zinc, and 100 mg/kg of copper. The mixture of limestone and sepiolite at the ratio of 1:0, 0:1, 1:1, and 2:1 to the soil was added to the soil in the amount of 0.2 %, 0.4 %, and 0.8 %, respectively. Pathumthani 1 rice was planted in the amended soil for 120 days. The Chemical characteristics of the soil and amended soil were analyzed both before and after planting. The soil was a sandy clay soil type with strongly acid (pH<4.5), high level of organic matter (OM), and high cation exchange capacities (CEC) values. The soil can be classified as high fertility soil. The forms of heavy metals in the soil both before and after rice planting were investigated using a sequential extraction method. After harvesting, the concentration of heavy metals in seed, stem mixed with leaf, and root was studied. The results indicated that rice could not survive without the soil modifier due to acidic soil condition and high concentration of heavy metals. It was found that the heavy metals (Cd, Pb, Zn, and Cu) in rice seedlings grown in limestone per sepiolite in the weight ratio of 2:1 at the concentration of 0.4%, did not exceed food standard. Sequential extraction results showed that forms of lead, zinc, and copper were bound to iron and manganese oxide (F4). Meanwhile, cadmium was bound to carbonate (F3). Heavy metals in the before planting soil were in an unstable form (F1-F3) more than in the after planting soil. Rice can absorb cadmium the most, followed by lead, zinc, and copper, respectively (Cd>Pb>Zn>Cu). Cadmium and lead were high risks to transfer to organisms while zinc and copper showed lower risk. Cadmium was highest translocation from root to shoot, followed by copper, zinc, and lead, respectively (Cd>Cu>Zn>Pb).

**Keywords:** soil improvement, rice, paddy soil, heavy metals

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคลากรหลายฝ่ายด้วยกัน ซึ่งผู้จัดทำใคร่ขอขอบคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ และดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำให้คำปรึกษา เสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา และกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้คำแนะนำให้คำปรึกษา เสนอแนะแนวทางแก้ปัญหา และกรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวก ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนการศึกษา ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดการทำวิทยานิพนธ์

กฤตยา กระทุ่มเขตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ


หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญรูป ..... ฌ
คำย่อ/สัญลักษณ์ ..... ฎ
**บทที่ 1 บทนำ** ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย/ปัญหา ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ..... 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย ..... 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 3
**บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง** ..... 4
2.1 สารปรับปรุงดิน ..... 4
2.1.1 ประเภทสารปรับปรุงดิน ..... 4
2.1.2 การใช้สารปรับปรุงดิน ..... 5
2.1.3 คุณสมบัติของสารปรับปรุงดินที่ใช้ ..... 5
2.2 โลหะหนัก (Heavy metal) ..... 7
2.2.1 แหล่งที่มาของโลหะหนัก ..... 7
2.2.2 การเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน ..... 8
2.2.3 ตะกั่ว (Pb) ..... 10
2.2.4 แคดเมียม (Cd) ..... 11
2.2.5 ทองแดง (Cu) ..... 12
2.2.6 สังกะสี (Zn) ..... 13
2.3 ดิน ..... 14
2.3.1 ชนิดและส่วนประกอบของดิน ..... 14
2.3.2 ส่วนประกอบของดินสามารถจำแนกได้เป็น 4 ส่วน ..... 14
2.3.3 คอลลอยด์ในดิน ..... 15
2.3.4 สมบัติของดิน ..... 17
2.3.5 ลักษณะดินจังหวัดระยอง ..... 19
2.4 ข้าว ..... 19
2.4.1 พฤกษศาสตร์ทั่วไป ..... 19
2.4.2 ลักษณะที่สำคัญของข้าว ..... 20
2.4.3 การจำแนกชนิดข้าว ..... 21
2.4.4 พันธุ์ข้าว ..... 22


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า


2.5 การปรับเสถียรหรือการทำก้อน ..... 22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 23
**บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย** ..... 26
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี ..... 26
3.1.1 อุปกรณ์ ..... 26
3.1.2 สารเคมี ..... 26
3.2 ตัวอย่างดิน พืช และสารปรับปรุง ..... 27
3.2.1 แหล่งที่มาของดิน ..... 27
3.2.2 พืชทดลอง ..... 28
3.2.3 สารปรับปรุงดิน ..... 28
3.3 การดำเนินการทดลอง ..... 29
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างดินสำหรับการวิเคราะห์ ..... 29
3.3.2 การเตรียมตัวอย่างสารปรับปรุงสำหรับการวิเคราะห์ ..... 29
3.3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินและสารปรับปรุงดิน ..... 30
3.3.4 การสังเคราะห์ตัวอย่างดิน ..... 30
3.3.5 การผสมดินสังเคราะห์กับสารปรับปรุงดิน ..... 30
3.3.6 การวางแผนการทดลอง ..... 30
3.3.7 ขั้นตอนการปลูกข้าว และบันทึกผล ..... 31
3.3.8 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในดิน ..... 32
3.3.9 การเตรียมตัวอย่างพืชสำหรับการวิเคราะห์ ..... 32
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล ..... 32
3.4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ..... 32
3.4.2 การวิเคราะห์การสะสมทางชีวภาพ ..... 32
3.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนย้ายของโลหะ ..... 33
**บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล** ..... 34
4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน ..... 34
4.1.1 สมบัติทั่วไป ..... 34
4.1.2 สมบัติของสารปรับปรุง ..... 35
4.1.3 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่างในดินหลังเติมสารปรับปรุงดิน ..... 37
4.2 ผลผลิตข้าว ..... 38
4.3 การเจริญเติบโตของข้าว ..... 40
4.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสารปรับปรุงดินต่อการลดลงของโลหะหนักในข้าว ..... 41
4.4.1 ทองแดง ..... 41
4.4.2 สังกะสี ..... 43
4.4.3 ตะกั่ว ..... 45


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.4 แคดเมียม ..... 47
4.5 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้น ..... 50
4.5.1 ทองแดง ..... 50
4.5.2 สังกะสี ..... 52
4.5.3 ตะกั่ว ..... 53
4.5.4 แคดเมียม ..... 54
4.6 ปัจจัยการสะสมโลหะหนักทางชีวภาพ ..... 56
4.7 การวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก ..... 57
**บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ** ..... 59
5.1 สรุปผลการวิจัย ..... 59
5.2 ข้อเสนอแนะ ..... 60
เอกสารอ้างอิง ..... 61
ภาคผนวก ..... 67
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์ดินและพืช ..... 68
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ดินและพืช ..... 74
ภาคผนวก ค ผลการเจริญเติบโตของข้าว ..... 80
ภาคผนวก ง ผลโลหะหนักในดินและพืช ..... 83
ภาคผนวก จ ผลวิเคราะห์ปัจจัยการสะสมทางชีวภาพและการเคลื่อนย้ายโลหะหนัก ..... 113
ภาคผนวก ฉ ผลวิเคราะห์ทางสถิติ ..... 122
ประวัติผู้เขียน ..... 127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


ตารางที่ หน้า

3.1 เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของดินและสารปรับปรุงดิน ทั้งก่อนและหลังการปลูกข้าว ..... 29
4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ..... 34
4.2 ค่าความเป็นกรดด่างและปริมาณโลหะหนักของสารปรับปรุงดิน ..... 35
4.3 ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุของสารปรับปรุงดินด้วยเทคนิค XRF ..... 36
4.4 ขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของสารปรับปรุงดิน ..... 37
4.5 น้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนโลหะหนักและเติมสารปรับปรุงดิน ..... 39
4.6 การประเมินอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เหมาะสมที่ทำให้โลหะหนักทุกชนิด ในเมล็ดน้อยที่สุดและไม่เกินค่ามาตรฐานอาหาร ..... 49
4.7 การเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากดินสู่ข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนโลหะหนักและ เติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน:ซีพีโอไลท์) อัตราส่วนต่างๆ ..... 57
4.8 การเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากรากสู่ส่วนเหนือดินของข้าว (เมล็ด+ลำต้นรวมกับใบ) ที่ปลูก ในดินปนเปื้อนโลหะหนักและเติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน:ซีพีโอไลท์) อัตราส่วนต่างๆ ..... 58
ข-1 ผลขนาดของอนุภาคดิน ในดินนาจังหวัดระยอง ..... 75
ข-2 ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุ ในสารปรับปรุงดินด้วยเทคนิค XRF ..... 75
ข-3 ผลเปอร์เซ็นต์ความชื้นในดินตัวอย่าง ..... 76
ข-4 ผลความเป็นกรดด่างในดินตัวอย่าง ..... 76
ข-5 ผลค่าการนำไฟฟ้าในดินตัวอย่าง ..... 77
ข-6 ผลความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินตัวอย่าง ..... 77
ข-7 ผลอินทรียวัตถุในดินตัวอย่าง ..... 78
ข-8 ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ในดินก่อนปลูกข้าว และหลังการปลูกข้าว ..... 79
ค-1 ความสูงของต้นข้าว ..... 80
ค-2 น้ำหนักของเมล็ดข้าวและต้นข้าว ..... 82
ง-1 ปริมาณทองแดงในข้าว ..... 83
ง-2 ปริมาณสังกะสีในข้าว ..... 85
ง-3 ปริมาณตะกั่วในข้าว ..... 87
ง-4 ปริมาณแคดเมียมในข้าว ..... 89
ง-5 ปริมาณทองแดงทั้งหมด (Total Cu) ในดินก่อนและหลังการปลูกข้าว ..... 91
ง-6 ปริมาณสังกะสีทั้งหมด (Total Zn) ในดินก่อนและหลังการปลูกข้าว ..... 92
ง-7 ปริมาณตะกั่วทั้งหมด (Total Pb) ในดินก่อนและหลังการปลูกข้าว ..... 93
ง-8 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total Cd) ในดินก่อนและหลังการปลูกข้าว ..... 94
ง-9 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินก่อนการปลูกข้าวของทองแดง ..... 95
ง-10 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินหลังการปลูกข้าวของทองแดง ..... 97
ง-11 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินก่อนการปลูกข้าวของสังกะสี ..... 99
ง-12 ผลการสกัดลำดับขั้นในดินหลังการปลูกข้าวของสังกะสี ..... 101


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง (ต่อ)


| ตารางที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| ง-13 | ผลการสกัดลำดับขั้นในดินก่อนการปลูกข้าวของตะกั่ว | 103 |
| ง-14 | ผลการสกัดลำดับขั้นในดินหลังการปลูกข้าวของตะกั่ว | 105 |
| ง-15 | ผลการสกัดลำดับขั้นในดินก่อนการปลูกข้าวของแคดเมียม | 107 |
| ง-16 | ผลการสกัดลำดับขั้นในดินหลังการปลูกข้าวของแคดเมียม | 109 |
| จ-1 | ผล BAF ทองแดง | 113 |
| จ-2 | ผล BAF สังกะสี | 115 |
| จ-3 | ผล BAF ตะกั่ว | 116 |
| จ-4 | ผล BAF แคดเมียม | 117 |
| จ-5 | ผล TF ทองแดง | 118 |
| จ-6 | ผล TF สังกะสี | 119 |
| จ-7 | ผล TF ตะกั่ว | 120 |
| จ-8 | ผล TF แคดเมียม | 121 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.1 | หินปูน | 6 |
| 2.2 | โครงสร้างซีพิโอไลท์ | 7 |
| 2.3 | ส่วนประกอบของดิน | 14 |
| 2.4 | แสดงโครงสร้างของซิลิกาเตตระฮีดรัล และอลูมินาออกตาฮีดรัล | 16 |
| 2.5 | หน้าตัดดิน | 18 |
| 3.1 | แปลงนาจังหวัดระยอง | 28 |
| 3.2 | หินปูนที่ใช้ในงานวิจัย | 28 |
| 3.3 | ซีพิโอไลท์ที่ใช้ในงานวิจัย | 29 |
| 3.4 | แผนการทดลองจากการจับฉลาก | 31 |
| 4.1 | ค่าความเป็นกรดด่างในดินเมื่อเติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน:ซีพิโอไลท์) ก่อนปลูกข้าว (a) และหลังปลูกข้าว (b) ในอัตราส่วนต่างๆ | 37 |
| 4.2 | ความสูงของต้นข้าวที่ปลูกในดินระยองปนเปื้อนโลหะหนักและเติมสารปรับปรุงดิน | 40 |
| 4.3 | ปริมาณทองแดงในเมล็ด (a) ลำต้นรวมกับใบ (b) และราก (c) เมื่อผสมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ | 42 |
| 4.4 | ปริมาณสังกะสีในเมล็ด (a) ลำต้นรวมกับใบ (b) และราก (c) เมื่อผสมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ | 44 |
| 4.5 | ปริมาณตะกั่วในเมล็ด (a) ลำต้นรวมกับใบ (b) และราก (c) เมื่อผสมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ | 46 |
| 4.6 | ปริมาณแคดเมียมในเมล็ด (a) ลำต้นรวมกับใบ (b) และราก (c) เมื่อผสมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ | 48 |
| 4.7 | สัดส่วนรูปฟอร์มทองแดงใน (a) ดินก่อนปลูกข้าว และ (b) ดินหลังจากปลูกข้าว แล้วที่วิเคราะห์ด้วยวิธีสกัดแบบลำดับขั้น 6 ขั้นตอน | 51 |
| 4.8 | สัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีใน (a) ดินก่อนปลูกข้าว และ (b) ดินหลังจากปลูกข้าว แล้วที่วิเคราะห์ด้วยวิธีสกัดแบบลำดับขั้น 6 ขั้นตอน | 53 |
| 4.9 | สัดส่วนรูปฟอร์มตะกั่วใน (a) ดินก่อนปลูกข้าว และ (b) ดินหลังจากปลูกข้าว แล้วที่วิเคราะห์ด้วยวิธีสกัดแบบลำดับขั้น 6 ขั้นตอน | 54 |
| 4.10 | สัดส่วนรูปฟอร์มแคดเมียมใน (a) ดินก่อนปลูกข้าว และ (b) ดินหลังจากปลูกข้าว แล้วที่วิเคราะห์ด้วยวิธีสกัดแบบลำดับขั้น 6 ขั้นตอน | 55 |
| ก-1 | การแบ่งพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างดินจากแปลงนาจังหวัดระยอง | 68 |
| ข-1 | ตารางสามเหลี่ยมสำหรับใช้พิจารณาประเภทของดิน | 74 |
| ง-1 | กราฟมาตรฐานของทองแดงของดินและพืช | 111 |
| ง-2 | กราฟมาตรฐานของสังกะสีของดินและพืช | 111 |
| ง-3 | กราฟมาตรฐานของตะกั่วของดินและพืช | 112 |
| ง-4 | กราฟมาตรฐานของแคดเมียมของดินและพืช | 112 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป (ต่อ)


| รูปที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| ฉ-1 | ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักของเมล็ดข้าวที่อัตราส่วนหินปูน:ซีพีโอไลท์ 1:0 และ 0:1 ที่ระดับความเข้มข้น 0.2% | 122 |
| ฉ-2 | ความแตกต่างระหว่างปริมาณทองแดงทั้งหมดในดินก่อนการทดลองและดินหลังการทดลอง | 123 |
| ฉ-3 | ความแตกต่างระหว่างปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินก่อนการทดลองและดินหลังการทดลอง | 124 |
| ฉ-4 | ความแตกต่างระหว่างปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดินก่อนการทดลองและดินหลังการทดลอง | 125 |
| ฉ-5 | ความแตกต่างระหว่างปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินก่อนการทดลองและดินหลังการทดลอง | 126 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# คำย่อ/สัญลักษณ์

| | |
|---|---|
| AAS | เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชั่น สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ |
| BAF | ค่าการสะสมทางชีวภาพ |
| CEC | ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก |
| cm | เซนติเมตร |
| cmol/kg | มิลลกรัมสมมูลต่อดิน 100 กรัม |
| Db | ความหนาแน่นรวมของดิน |
| EC | ค่าการนำไฟฟ้า |
| g/kg | กรัมต่อกิโลกรัม |
| mg/kg | มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม |
| TF | ค่าการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก |
| w/w | น้ำหนักต่อน้ำหนัก |
| XRF | เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ |
| °C | องศาเซลเซียส |
| % | เปอร์เซ็นต์ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมของประเทศไทยมีการเจริญเติบโตอย่างมากและรวดเร็ว เนื่องมาจากการพัฒนาทางเศรษฐกิจและความต้องการของมนุษย์ต่อทรัพยากร ซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะมีการปลดปล่อยโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมทางดิน น้ำ และอากาศ อีกทั้งพื้นที่สำหรับการกำจัดของเสียลดลงอย่างมาก ส่งผลให้การปนเปื้อนโลหะหนักในดินเป็นปัญหาหลักที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสภาพแวดล้อม ซึ่งกิจกรรมของมนุษย์เป็นปัจจัยหลักของการเพิ่มขึ้นและแพร่กระจายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม (วนิดา, 2557) โดยเฉพาะการปล่อยของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การทำเหมืองแร่ น้ำเสียชุมชน ตลอดจนการใช้ปุ๋ยและสารเคมีทางการเกษตร (Adegoke *et al.*, 2009) โลหะหนัก (heavy metals) เช่น ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม ปรอท และสารหนู เป็นธาตุที่ได้รับการพิจารณาว่ามีความเป็นพิษสูงในสิ่งแวดล้อม ดังนั้นมันสามารถตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้นาน อีกทั้งยังสามารถเคลื่อนย้ายผ่านดินลงสู่น้ำบาดาล และเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารผ่านการดูดซึมโดยพืช เช่น ข้าว ข้าวสาลี หรือพืชผักต่างๆ (Boularbah *et al.*, 2006) ซึ่งมีการสำรวจการปนเปื้อนโลหะหนักในประเทศไทยที่พบว่าแคดเมียม ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี เป็นโลหะหนักที่สะสมอยู่ในดินและผลผลิตของพืชค่อนข้างสูง จนอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของดินและคุณภาพของผลผลิตพืชที่เป็นอาหาร (พิชิต และสุรสิทธิ์, 2542) และหากมนุษย์ได้รับโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายจะมีผลต่อสุขภาพและทำให้เกิดโรคต่างๆ ตามมา (บุณฑริกา, 2555)

เทคโนโลยีการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสารมลพิษ มีด้วยกันหลายวิธีเช่น การล้างดิน การฝังกลบ การปลูกพืชบำบัด และการใช้วิธีทางชีวภาพ แต่วิธีดังกล่าวค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงมีการศึกษาวิธีการบำบัดภายในพื้นที่ (in situ) โดยไม่มีการเคลื่อนย้ายตัวกลางหรือดินไปพื้นที่อื่น (Perez-de-Mora *et al.*, 2006) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเติมสารปรับปรุงดินลงในดินเพื่อเปลี่ยนรูปให้โลหะหนักหรือสารปนเปื้อนไม่ให้เกิดการแพร่กระจาย ละลายได้น้อยลง เคลื่อนที่ได้ช้าลง และความเป็นพิษได้น้อยลง ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดที่ไม่ยุ่งยาก มีประสิทธิภาพและราคาถูก โดยสารปรับปรุงดินที่ใช้ได้แก่ หินปูน (Basta *et al.*, 2004) เบนโทไนท์ (Sun et al., 2013) ซีโอไลท์ (Lianwen *et al.*, 2018) และซีพีโอไลท์ (Abad-Valle *et al.*, 2016) และการใช้สารปรับปรุงรวม (Hang *et al.*, 2014) มีการศึกษาผลสารปรับปรุงดินในแปลงนาที่ปนเปื้อน พบว่าการใช้หินปูนในการปรับปรุงดิน ทำให้ข้าวมีผลผลิตเพิ่มขึ้น และมีความเข้มข้นของทองแดง และแคดเมียมในเมล็ดข้าวลดลง (Ping *et al.*, 2008) อย่างไรก็ตาม สารปรับปรุงที่ต่างกันก็มีความสามารถที่ต่างกันในการยับยั้งโลหะหนักในดิน ภายใต้บางสภาวะสารปรับปรุงอาจจะส่งผลต่อโลหะชนิดหนึ่ง แต่อาจจะไม่ส่งผลต่อโลหะอีกชนิด หรือแม้กระทั่งไปเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ (Gonzalez *et al.*, 2012) งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความเหมาะสมของสารปรับปรุงดิน เพื่อปรับปรุงดินสำหรับปลูกข้าว ซึ่งข้าวเป็นอาหารหลักของประชากรโลกมากกว่า 50% (Huang *et al.*, 2011) และเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญที่มีการปลูกอย่างกว้างขวางของประเทศไทย (กัณฑมาศ, 2556) โดยผสมสารปรับปรุงดินลงในดินที่อัตราส่วนแตกต่างกัน เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้ข้าวเจริญเติบโตได้ดีและมีผลผลิตสูงสุด นอกจากนี้ ยังศึกษาปริมาณการดูดซึมและการสะสมของโลหะในข้าวที่ปลูก เพื่อ

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขดินปนเปื้อนโลหะหนัก ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงดินด้านการเกษตร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) ศึกษาคุณสมบัติของสารปรับปรุงดิน และดินผสมสารปรับปรุงดินในแต่ละอัตราส่วนทั้งก่อนและหลังการปลูกข้าว

2) ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้สารปรับปรุงดินสามารถลดการดูดซับโลหะหนักในข้าวได้มากที่สุด

3) ศึกษาปริมาณโลหะหนักที่ดูดซึมและสะสมในส่วนต่างๆ ของข้าว

4) ศึกษาค่าการเคลื่อนที่ และการสะสมทางชีวภาพของโลหะหนัก

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) เก็บตัวอย่างดินจากจังหวัดระยอง ทำการเตรียมดินก่อนปลูกข้าว และเพาะกล้าข้าว 1 สายพันธุ์ (ปทุมธานี 1) เป็นเวลา 15 วัน

2) ทำการสังเคราะห์ดิน โดยผสมสารละลายโลหะหนักตะกั่ว (Pb) 150 mg/kg สังกะสี (Zn) 150 mg/kg แคดเมียม (Cd) 1 mg/kg และทองแดง (Cu) 100 mg/kg (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551) ลงในดิน บ่มดินเป็นเวลา 1 เดือน

3) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของดินและดินผสมสารปรับปรุงดินแล้ว โดยวิเคราะห์พารามิเตอร์ดังนี้ ขนาดของอนุภาค (Particle size) ความหนาแน่นรวมของดิน (bulk density, Db) ความชื้น (Moisture) ความเป็นกรดด่าง (pH) การนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity, CEC) และอินทรียวัตถุ (Organic matter, OM)

4) ศึกษาปริมาณโลหะหนักทั้งหมดโดยสกัดด้วยวิธี Acid digestion, และศึกษาโลหะหนักในรูปต่างๆ โดยสกัดด้วยวิธี Sequential extraction และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วย Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

5) ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารปรับปรุงดินต่อการเจริญเติบโตของข้าว โดยใช้สารปรับปรุงดิน 2 ชนิดคือ หินปูน (limestone) และซีพิโอไลท์ (Sepiolite) ที่อัตราส่วนของสารปรับปรุงดังนี้

- ดินระยอง (ไม่สังเคราะห์ดินและไม่ใส่สารปรับปรุง)
- ดินควบคุม (ไม่ใส่สารปรับปรุง)
- ดินผสมหินปูน:ซีพิโอไลท์ (1:0)
- ดินผสมหินปูน:ซีพิโอไลท์ (0:1)
- ดินผสมหินปูน:ซีพิโอไลท์ (1:1)
- ดินผสมหินปูน:ซีพิโอไลท์ (2:1)

โดยแปรผันอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินกับดินจังหวัดระยอง ในอัตราส่วน 0, 0.2, 0.4 และ 0.8% (w/w) ทำซ้ำ 3 ซ้ำ ในแต่ละอัตราส่วน สังเกตการเจริญเติบโตจากการวัดความสูงทุกสัปดาห์

6) ทำการเก็บเกี่ยวเมื่อครบ 120 วัน ชั่งน้ำหนักต้นข้าวในแต่ละกระถาง นำข้าวไปอบ ชั่งน้ำหนักแห้งของข้าวนับเมล็ดแต่ละกระถาง วัดปริมาณโลหะในเมล็ด ลำต้นรวมกับใบ และราก

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) ศึกษาการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก (Translocation factor, TF) และศึกษาการสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation factor, BAF)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในพืชที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนโลหะ

2) เพื่อเป็นแนวทางในการลดค่าใช้จ่ายในการแก้ไขดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักและสารเคมีอันตรายอื่นๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 สารปรับปรุงดิน (Soil Conditioners)

เป็นสารที่เราใช้ใส่ลงไปในดินเพื่อปรับปรุงฟื้นฟูดินในด้านกายภาพ เคมี จุลชีวะ และรวมทั้งธาตุอาหารพืชในดิน เพื่อปรับปรุงดินให้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช สารปรับปรุงดินมีทั้งที่เกิดจากธรรมชาติ และจากการสังเคราะห์ขึ้น ทั้งในรูปสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ และสารผสมที่มีการปรุงแต่งหรือไม่มีการปรุงแต่งในรูปแบบต่างๆ และสารเคมีในรูปผลพลอยได้ต่างๆ ซึ่งปัจจุบันมีจำหน่ายมากมายหลายชนิด โดยทั่วไปในการใช้สารปรับปรุงดินนั้นมักมีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินเป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การใช้เพื่อลดความแน่นของดิน ลดการเกิดผิวดินแข็งเป็นแผ่น การไหล่บ่าของน้ำและการกร่อนของดิน โดยการเพิ่มการแทรกซึมน้ำ การระบายน้ำและอากาศในดิน ความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน (ปิยะ, 2553) และรวมทั้งการใช้สารปรับปรุงดินที่มีวัตถุประสงค์สำคัญเพื่อปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดิน โดยเฉพาะ การปรับปรุงดินที่มีความเป็นกรดจัด การปรับปรุงสมบัติความจุในการดูดธาตุอาหารพืชประจุบวก รวมทั้งเพิ่มหรือเร่งกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน

### 2.1.1 ประเภทของสารปรับปรุงดิน

การจำแนกประเภทสารปรับปรุงดินขึ้นกับเกณฑ์ลักษณะองค์ประกอบของตัวสาร แหล่งกำเนิด และวัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์เป็นหลัก โดยจำแนกประเภทออกได้ดังนี้

2.1.1.1 จำแนกประเภทตามลักษณะองค์ประกอบของตัวสาร

1) สารอนินทรีย์หรือสารเคมี เป็นสารปรับปรุงดินที่ได้จากธรรมชาติโดยตรงหรือมีการนำมาปรุงแต่งโดยใช้ความร้อน เช่น สารปรับปรุงในรูปหินหรือแร่ชนิดต่างๆ เช่น ปูนมาร์ล (liming) ยิปซัม (gypsum) พัมมิซ (pumice) ซีโอไลท์ (zeolite) ฯลฯ รวมทั้งสารเคมีที่สังเคราะห์ขึ้น เช่น สารประกอบแคลเซียม โพลีซัลไฟท์ (calcium polysulfide) หรือสารที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ฟอสโฟยิปซัม (phosphogypsum) เป็นต้น

2) สารอินทรีย์ เป็นสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ไม่มีการปรุงแต่งหรือมีการปรุงแต่ง เช่น เศษซากพืช ปุ๋ยหมัก ฯลฯ สารอินทรีย์ที่เป็นผลพลอยได้ทางเกษตรโดยตรงและจากโรงงานอุตสาหกรรมทั้งใน และนอกภาคเกษตร เช่น ขุยมะพร้าว แกลบดิบ เปลือกมันค้างปี กากอ้อยจากโรงงานน้ำตาล สารฮิวมัสและจีเอ็มแอล (GML) จากโรงงานผงชูรส กากกระดาษ รวมทั้งสารอินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยกระบวนการทางเคมี เช่น สารโพลีอครีลามีด (PAM) สารดูดน้ำพอลิเมอร์ สารประกอบแอมโมเนียมลอเร็ทซัลเฟต เป็นต้น

3) สารอนินทรีย์ผสมสารอินทรีย์ เป็นสารปรับปรุงดินที่ผลิตขึ้นโดยการผสมวัสดุปรับปรุงดินในรูปสารอนินทรีย์ลงในสารอินทรีย์ เพื่อเพิ่มคุณค่าของตัวสารหรือเพื่อการใช้ประโยชน์แบบผสมผสาน เช่น การผลิตปุ๋ยหมักโดยการผสมปุ๋ยเคมีและพัมมิซเข้าด้วยกัน หรือการผลิตสารปรับปรุงและบำรุงดินเพื่อใช้ประโยชน์ในลักษณะเอนกประสงค์ เช่น สารปรับปรุงดินในรูปสารทีซี (Terra Cottem, TC) ที่มีองค์ประกอบสำคัญประกอบด้วยสารดูดน้ำพอลิเมอร์ ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ และสารเร่งการเจริญเติบโตของพืช เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2 จำแนกประเภทตามแหล่งที่มาหรือแหล่งกำเนิด

1) สารปรับปรุงดินที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ เช่น เศษพืชต่างๆ พัมมิซ

2) สารปรับปรุงดินในรูปผลพลอยได้ต่างๆ เช่น ขุยมะพร้าว แกลบดิน เปลือกมันค้างปี

3) สารปรับปรุงดินที่ได้จากการสกัดหรือจากการสังเคราะห์ทางเคมี เช่น สารเคมีในรูปสารประกอบแคลเซียมโพลีซัลไฟด์ สารพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ สารโพลีอครีลามีด (PAM)

2.1.1.3 จำแนกประเภทตามลักษณะการใช้ประโยชน์เพื่อการปรับปรุงดิน

1) สารปรับปรุงดินทางด้านกายภาพเป็นหลัก ได้แก่ สารปรับปรุงดินที่ในรูปสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น เปลือกมันค้างปี กากอ้อย ขุยมะพร้าว แกลบดิน ฟอสโฟยิปซัม สารพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ

2) สารปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดินเป็นหลักได้แก่ สารปรับปรุงดินในรูปสารประกอบอนินทรีย์หรือสารเคมี เช่น วัสดุปูนไลม์ (ปูนสุก ปูนขาว หินปูน ปูนมาร์ล) กำมะถันผง และรวมทั้งแร่ต่างๆ เช่น พัมมิซ ซีโอไลท์ เพื่อเพิ่มสมบัติความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity) และความจุบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity) ของดินเนื้อหยาบ เป็นต้น

**2.1.2 การใช้สารปรับปรุงดิน**

การปรับปรุงบำรุงดินที่มีความสามารถในการให้ผลผลิตพืชต่ำ จะต้องมีการปฏิบัติพร้อมไปกับการอนุรักษ์ดินหรือการควบคุมการสูญเสียเนื้อดินออกไปจากแปลงปลูก ดินบางประเภทอาจไม่มีปัญหาสำคัญทางด้านปริมาณอินทรียวัตถุ ชนิด และปริมาณธาตุอาหารพืชในดินมากนัก แต่อาจมีปัญหาสำคัญทางด้านสมบัติทางกายภาพ เช่น เป็นดินที่มีเนื้อดินที่ไม่จับตัวกันเป็นก้อน ไม่อุ้มน้ำ เกิดการชะล้างพังทะลายง่าย หรือผิวหน้าดินอาจเกิดการแข็งตัวแน่นทึบ เวลาเมื่อดินเปียกและแห้งตัวลง ปัญหาต่างๆ เหล่านี้ การใช้ปุ๋ยเคมีอย่างเดียวไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ จำเป็นต้องมีการใช้ปุ๋ยอินทรีย์หรือสารปรับปรุงดินในรูปสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ธรรมชาติ สารอินทรีย์ที่ได้จากผลพลอยได้ทางการเกษตร หรืออาจใช้ผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น ฟอสโฟยิปซัมจากโรงงานผลิตปุ๋ยเคมีเพื่อแก้ปัญหาการเกิดแผ่นแข็งบนผิวดิน สารปรับปรุงดินในรูปปูนไลม์ ปูนโดโลไมท์ หินฝุ่นหรือหินปูนบด แร่ที่มีการปรุงแต่งชนิดต่างๆ หรือในรูปสารอินทรีย์สังเคราะห์ต่างๆ เช่น สารดูดน้ำพอลิเมอร์ ฯลฯ ซึ่งสำหรับมันสำปะหลังที่เป็นพืชไร่ที่มีราคาผลผลิตต่อหน่วยค่อนข้างต่ำและไม่แน่นอน การใช้สารปรับปรุงดินในรูปแร่ปรุงแต่งสารสังเคราะห์หรือสารอื่น ที่มีราคาต่อหน่วยค่อนข้างแพง ในทางปฏิบัติไม่แนะนำให้ใช้เพราะจะทำให้มีต้นทุนการปลูกมันสำปะหลังสูงเกินไปและผลที่ได้อาจทำให้ไม่คุ้มกับค่าใช้จ่ายที่ลงทุนไป

**2.1.3 คุณสมบัติสารปรับปรุงดินที่ใช้**

2.1.3.1 หินปูน (limestone)

หินปูนเป็นสารอนินทรีย์ที่เกิดจากการตกตะกอนและทับถมของเปลือกหอย กระดูกสัตว์ และหินในทะเลกลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว มีความบริสุทธิ์สูง ไม่เป็นพิษ และมีความเสถียรทางเคมี จึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์อย่างมากหลายด้าน เช่น เป็นวัตถุดิบหลักทางอุตสาหกรรม (มุกดา, 2545) เช่น อุตสาหกรรมเหล็กกล้า อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมแก้ว เป็นต้น และด้านการเกษตร ช่วยปรับค่าความเป็นกรดด่างในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีหลากหลายงานวิจัยที่นำหินปูนหรือปูนขาวมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินให้เหมาะสมแก่การปลูกพืช (ศิราณี, 2557) และช่วยลดปริมาณความโลหะหนักในส่วนที่พืชและสิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ เช่น ปูนขาวช่วยลดความเป็นพิษของอะลูมินัมในดินที่ปลูกข้าวโพด (ดนัย, 2553) ปริมาณความเข้มข้นหินปูนสามารถช่วยเพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ในดิน เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยเคมีและเพิ่มความเป็นกรดด่างในดินให้สูงขึ้น (Wong and Selvam, 2006) หินปูนเมื่อละลายน้ำสามารถเพิ่มความเป็นกรดด่างของน้ำ และทำให้โลหะหนักเกิดการตกตะกอนทางเคมี เกิดเป็นตะกอนของโลหะคาร์บอเนต นอกจากนั้นเมื่อความเป็นกรดด่างสูงขึ้น ทำให้โลหะหนักแลกเปลี่ยนประจุของไฮดรอกไซด์ ซึ่งโลหะหนักจะอยู่ในรูปที่พืชหรือสิ่งมีชีวิตไม่สามารถดูดมาใช้ได้ (Chuasavathi *et al.*, 2011) การฟื้นฟูดินปนเปื้อนโลหะหนัก โดยใช้หินปูนผสมกับซีพิโอไลท์สามารถช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างในดิน และลดความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินได้ (Hang *et al.*, 2014) ซึ่งหินปูนสามารถรวมกับสารปรับปรุงชนิดอื่นๆ เพื่อลดความสามารถในการละลายและการเคลื่อนที่ของโลหะหนักได้ เมื่อมีการเติมหินปูนในดินปนเปื้อนโลหะหนักนอกจากจะทำให้ความเป็นกรดด่างในดินสูงขึ้น และยังสามารถทำให้โลหะหนักตกตะกอนในรูปคาร์บอเนตหรือไฮดรอกไซด์ และลดการละลายของโลหะหนัก (Castaldi *et al.*, 2005) และหินปูนยังได้รับการยอมรับให้เป็นทางเลือกที่สำคัญในการนำไปลดความเป็นพิษโลหะหนักในดินและกากตะกอนที่ปนเปื้อน (Bolan and Duraisamy, 2003) ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับความสนใจในหลายประเทศ (Chuasavathi *et al.*, 2010)

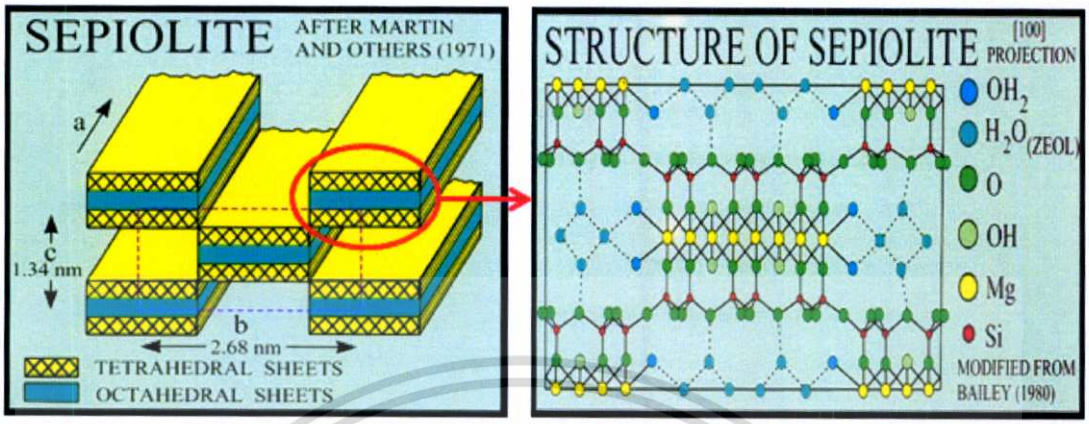
**รูปที่ 2.1** หินปูน (Talco, 2017)

2.1.3.2 ซีพิโอไลท์ (Sepiolite)

ซีพิโอไลท์เป็นแร่ดินเหนียวซึ่งส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มฟิลโลซิลิเกต (phyllosilicate) เป็นพวกโครงสร้างชนิดแบบ 2:1 มีโครงสร้างเป็นแบบแผน มีสูตรเคมีคือ $Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2.6H_2O$ ซึ่งแตกต่างจากแร่ดินเหนียวซิลิเกตชนิดอื่นๆ ตรงที่กลุ่มของ tetrahedral ของแต่ละแผ่นมีทั้งชี้ขึ้นชี้ลงสลับกัน ทำให้แผ่น tetrahedral ถูกแบ่งเป็นแถบที่มีความกว้างแตกต่างกัน ซีพิโอไลท์เป็นแมกนีเซียม (Mg-silicate) ที่มีช่องภายในเรียกว่า “zeolitic pore” มีลักษณะคล้ายเข็มเป็นเส้นใย น้ำหนักเบามาก (โซเฟีย, 2560) เสถียรต่อความร้อนและสารเคมี ความหนาแน่นต่ำ ไม่บวมเมื่อสัมผัสกับน้ำ (George, 2017) และมีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง อีกทั้งมีคุณสมบัติดูดซับสูง (EFSA, 2013) ตลอดจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่างที่มีความพิเศษของมัน ทำให้มีคุณสมบัติแขวนลอยและมีการดูดซับที่โดดเด่น ซึ่งทำให้มันเป็นวัสดุที่มีประโยชน์และถูกนำไปใช้ในงานที่หลากหลาย




**รูปที่ 2.2** โครงสร้างของซีพิโอไลท์ (Moore and Reynold, 1997)

จากการศึกษาแร่ดินเหนียวพบว่าซีพิโอไลท์เป็นที่ยอมรับและได้รับความสนใจในการนำมาเป็นตัวดูดซับโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี และทองแดง (Padilla-Ortega *et al.*, 2013) ปัจจุบันมีหลายงานวิจัยที่นำซีพิโอไลท์มาใช้พื้นที่จริงที่มีการปนเปื้อนเพื่อตรึงโลหะหนักในดิน (Lee *et al.*, 2009) ซีพิโอไลท์เป็นสารที่มีความเป็นเบสสูง (Wang *et al.*, 2006) ทำให้ค่าความเป็นกรดด่างของดินเพิ่มขึ้น ซึ่งความเป็นกรดด่างมีบทบาทสำคัญมากต่อโลหะหนักที่อยู่ในรูปฟอร์มที่สามารถเคลื่อนที่และสิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (Janos *et al.*, 2010) ซีพิโอไลท์มีประสิทธิภาพสูงใช้กันอย่างแพร่หลาย และราคาถูก โดยการใช้ซีพิโอไลท์ตัวเดียว หรือใช้ร่วมกับวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น หินปูน ก็สามารถลดปริมาณตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในข้าวกล้อง (Hang *et al.*, 2014) และสามารถช่วยลดปริมาณโลหะหนักในผัก (Liang *et al.*, 2014)

## 2.2 โลหะหนัก (Heavy metal)

โลหะหนักคือ ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป ความหนาแน่นเกินกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีเลขเชิงอะตอม (Atomic number) อยู่ในช่วง 23-92 จัดเป็นธาตุพิษ (Toxic elements) ที่สามารถก่อให้เกิดมลพิษเมื่อปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมและสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ ได้แก่ แคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี ปรอท สารหนู ทองแดง โครเมียม เป็นต้น โลหะหนักแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางเคมีที่มีความแตกต่างกัน จึงทำให้ความเป็นพิษของโลหะหนักในแต่ละตัวมีความเป็นพิษที่แตกต่างกัน ซึ่งโลหะหนักบางชนิดก็มีประโยชน์ต่อพืชและสัตว์ (สิทธิชัย, 2558) ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนัก ปริมาณ และระยะเวลาที่ได้รับสารโลหะหนัก

### 2.2.1 แหล่งที่มาของโลหะหนัก

แหล่งที่มาของโลหะหนักโดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แหล่งดังนี้

2.2.1.1 แหล่งตามธรรมชาติ โลหะหนักจะปะปนอยู่กับหินและแร่ธาตุชนิดต่างๆ พบว่าแคดเมียมเกิดปะปนกับแร่สังกะสีตามกระบวนการธรรมชาติ เช่น การผุพังสลายของหินและแร่ การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระเบิดของภูเขาไฟ เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายของโลหะหนักเข้าสู่สิ่งแวดล้อม (Amaral *et al*., 2014)

2.2.1.2 แหล่งที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์

1) แหล่งอุตสาหกรรม เช่น การทำเหมืองแร่และการถลุงโลหะหนัก โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โรงงานผลิตแบตเตอรี่ โรงงานผลิตสารเคมี โรงงานสีย้อมผ้า และโรงงานฟอกหนังสัตว์ เป็นต้น โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักปล่อยน้ำเสียและสารพิษต่างๆ รวมทั้งโลหะหนักเข้าสู่สิ่งแวดล้อม โดยแขวนลอยอยู่ในรูปฝุ่นและเขม่าควันหรือปะปนอยู่ในกากตะกอนและน้ำทิ้ง ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ บรรยากาศ ดิน และตัวกลางอื่นๆ เช่น กรณีตัวอย่างห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี ได้รับผลกระทบจากการปล่อยน้ำทิ้งของเหมืองตะกั่วที่ปนเปื้อนตะกั่วสูงลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ส่งผลให้สัตว์น้ำในห้วยลดลง พืชผลทางเกษตรเสียหาย และประชาชนบริเวณดังกล่าวเกิดภาวะเป็นพิษจากตะกั่ว (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

2) แหล่งเกษตรกรรม เกษตรในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นการเกษตรเชิงเดี่ยวคือ ปลูกพืชเศรษฐกิจชนิดเดียวในพื้นที่ และเก็บเกี่ยวผลผลิตในครั้งเดียวจึงต้องการการดูแลรักษามาก เนื่องจากมีความเสี่ยงต่อความเสียหายด้วยโรคและแมลง รวมถึงโอกาสในการขาดทุนมากกว่าปลกพืชผสมผสาน จึงมีการใช้ปุ๋ยเคมีและสารกำจัดศัตรูพืชในรูปของสารเคมีต่างๆ ในการจัดการทางการเกษตร พบว่าในปุ๋ยและสารเคมีต่างๆ บางส่วนมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบอยู่ เมื่อใช้เป็นระยะเวลานานจะเกิดการสะสมโลหะหนักในพื้นเกษตรกรรมและเคลื่อนย้ายเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร (ศุภมาศ, 2540)

3) แหล่งชุมชน เป็นแหล่งก่อให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักลงสู่ดินและแหล่งน้ำได้มาก เนื่องจากการทิ้งขยะและสิ่งปฏิกูลต่างๆ ที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบอยู่ เช่น กระดาษ สีทาบ้าน ถ่านไฟฉาย หม้อแบตเตอรี่รถยนต์ และเศษภาชนะที่เคลือบด้วยโลหะ ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ และการใช้พื้นที่เป็นหลุมฝังกลบขยะ

**2.2.2 การเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน**

การเคลื่อนที่ในดิน โดยปกติแล้วในดินจะมีโลหะหนักสะสมอยู่ในระดับต่ำ จากการสลายตัวและผุพังของวัตถุต้นกำเนิดดิน ซึ่งปริมาณของโลหะหนักที่อยู่ในดินจะมีค่าผันแปรไปตามวัตถุต้นกำเนิด ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน เนื้อดินและระดับความลึก ซึ่งการสะสมโลหะหนักในดินบางส่วนจะคงอยู่ในดินและบางส่วนจะสามารถเคลื่อนย้ายได้ ซึ่งการเคลื่อนย้ายได้ของโลหะหนักในดินจะเกิดขึ้นในหลายกรณี เช่น การดูดกินโดยพืช

2.2.2.1 การเคลื่อนที่ (Mobility)

การเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสามารถในการละลาย (solubility) ของโลหะชนิดนั้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสภาพการเคลื่อนย้ายได้ของโลหะหนัก และยังมีบทบาทสำคัญในการบ่งบอกถึงการขาดแคลนธาตุ หรือการมีมากจนเกิดความเป็นพิษต่อดิน การเคลื่อนที่ของโลหะในดินจะเกิดขึ้น 3 รูปหลัก ได้แก่ การนำไปใช้ของพืช การนำไปใช้ของจุลินทรีย์ และการเคลื่อนย้ายในสภาพสารละลายและสารแขวนลอย เนื่องจากการแพร่และการไหลของมวล (ศุภมาศ, 2540) ปัจจัยที่มีผลต่อสภาพการละลายและการเคลื่อนที่ของโลหะ ได้แก่

1) ความเป็นกรดด่างของดิน เป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมการเคลื่อนที่ของโลหะหนักหรือสารพิษในดิน เพราะเมื่อดินมีสภาพกรดด่างที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของโลหะระหว่างส่วนที่เป็นของแข็งซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้น้อย และส่วนที่ละลายได้ในดินซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเคลื่อนที่ได้ดี เช่น สภาพการละลายของเหล็ก ตะกั่ว และแคดเมียมจะต่ำมากเมื่อดินมีสภาพเป็นกลาง (pH=7) และสภาพการละลายจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อดินมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น (pH<5) เมื่อดินอยู่ในสภาพที่เป็นกรดไฮโดรเจนไอออน ($H^+$) ในดินจะมีการแข่งขันกับโลหะทำให้ดินมีความสามรถดูดซับแคตไอออนต่ำลง รวมถึงยังเป็นการเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก (วรชาติ, 2555)

2) สภาพศักย์รีดอกซ์ (redox potential) การเปลี่ยนแปลงของศักย์รีดอกซ์ในดินเป็นผลมาจากกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์ในดิน หากดินมีการระบายอากาศได้ดี จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนก็จะมีการเจริญเติบโตได้ดี แต่ถ้าดินมีการระบายอากาศไม่ดี ทำให้อัตราการใช้ออกซิเจนบนอากาศลงสู่ดินลดน้อยลง ดินจะเริ่มขาดออกซิเจนส่งผลให้จุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจนเจริญเติบโตมากขึ้น (มีการใช้ไนเตรทหรือเฟอร์ริกเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน) และส่งผลให้ศักย์รีดอกซ์ของดินเริ่มลดลง (สุภาพร, 2545) การเปลี่ยนแปลงสภาพศักย์รีดอกซ์ของดินมีผลต่อสภาพการละลายได้ของโลหะ เช่น เมื่อศักย์รีดอกซ์ของดินลดลงจนดินอยู่ในสภาพรีดักชั่น (<100 mV) สภาพการละลายได้ของเหล็ก แมงกานีส โซเดียม และโพแทสเซียมจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่สภาพการละลายได้ของสังกะสีและทองแดงจะลดลง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

3) เนื้อดิน ลักษณะเนื้อดินที่มีความแตกต่างกันจะส่งผลถึงความสามารถในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักในดิน (สุภาพร, 2545) ซึ่งดินที่มีเนื้อดินละเอียดจะมีคุณสมบัติที่ดูดซับสารหรือโลหะต่างๆ ได้ดีกว่าดินเนื้อหยาบ ประกอบกับดินเหนียวมีขนาดอนุภาคที่เล็ก รูปร่างแบน และยังมีประจุลบที่ผิวจำนวนมาก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) จึงสามารถดูดซับโลหะที่มีประจุบวกไว้ได้ดี โลหะจึงละลายออกมาสู่สารละลายดินและเคลื่อนที่ได้น้อยลงเมื่อถูกดูดซับที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติและปริมาณของตำแหน่งดูดซับของอนุภาคดินเหนียวที่เป็นองค์ประกอบในดิน

4) วัตถุต้นกำเนิดดิน ซึ่งจะมีองค์ประกอบจำพวกแร่ธาตุอยู่หลายชนิด ซึ่งสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ กับโลหะ เช่น การแทนที่ (isomorphous substitution) ของอนุภาคในแร่ หรือการดูดซับที่ผิวของแร่ (ศุภมาศ, 2540) เช่น การแทนที่แคลเซียมไอออน ($Ca^{2+}$) ด้วยตะกั่วไอออน ($Pb^{2+}$) ในโครงสร้างของแร่ไฮดรอกอะพาไทต์ ทำให้เกิดแร่ชนิดใหม่ คือ ไฮดรอกซีไพโรเมอร์ไฟท์ ที่มีความสามารถในการละลายต่ำส่งผลให้สภาพการละลายของตะกั่วลดลงด้วย เนื่องจากตะกั่วถูกตรึงอยู่ในโครงสร้างของแร่

5) ชนิด (species) ของโลหะหนัก โลหะหนักมีความสามารถเคลื่อนย้ายได้ยากง่ายแตกต่างกัน โดยโลหะหนักที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย เช่น แคดเมียม สังกะสี และนิกเกิล เคลื่อนย้ายได้ปานกลาง เช่น ทองแดง ส่วนที่เคลื่อนย้ายได้น้อยหรือไม่เคลื่อนย้ายเลย เช่น ตะกั่ว ปรอทและโครเมียม (ศิริพร, 2549)

6) อินทรียวัตถุในดินและในสารละลายดิน สารอินทรีย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่มีประจุ จึงสามารถดูดซับโลหะได้เช่นเดียวกับอนุภาคดินเหนียว หรืออาจเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ นอกจากนี้สารอินทรีย์ยังสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดด่างของดินซึ่งมีผลโดยตรงกับความสามารถในการละลายของโลหะ

7) ไอออนของธาตุอื่นที่มีอยู่ในสารละลายดิน ที่สามารถเกิดสารประกอบกับโลหะแล้วเกิดตะกอนหรือเปลี่ยนรูปที่ละลายได้ดีขึ้น

8) สมบัติอื่นของดิน ได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิ และกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน ซึ่งเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงศักย์รีดอกซ์ในดิน และยังสัมพันธ์กับลักษณะเนื้อดิน และปริมาณอินทรียวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.2 การดูดกินโดยพืช พืชที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักมากหรือน้อยแตกต่างกันไปจะขึ้นอยู่กับลักษณะดินที่ใช้ปลูกพืช ชนิดของพืช และอายุของพืชที่ปลูก พืชแต่ละชนิดมีการสะสมโลหะหนักที่แตกต่างกันไป เนื่องจากพืชแต่ละชนิดมีความต้องการโลหะหนักที่แตกต่างกัน รวมถึงความสามารถในการดึงดูดและความทนทานต่อโลหะหนัก การดึงดูดโลหะหนักจากดินสู่พืชโดยรากจะมีกลไกในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักคือ การพา (convection) หรือ mass flow และ การแพร่ (diffusion) (ศิริพร, 2549)

**2.2.3 ตะกั่ว (Lead, Pb)**

ตะกั่วเป็นโลหะกรุ๊ป 5A ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 82 จุดหลอมเหลว 327 องศาเซลเซียส จัดเป็นโลหะที่ค่อนข้างอ่อน จึงง่ายต่อการหลอม ตะกั่วมีลักษณะที่อ่อนมาก ง่ายต่อการตัดขึ้นรูปและแปรรูป ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับงานโครงสร้าง จึงนำมาใช้เป็นรางระบายน้ำ ท่อส่งน้ำ ตะกั่วมีสมบัติทางกายภาพและเคมีคล้ายดีบุก ทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย ตะกั่วเป็นโลหะที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยานัก ทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย ทนต่อการผุกร่อน โดยทั่วไปพบตะกั่วได้ทั้งในดิน หิน น้ำ พืช และอากาศ โดยเฉลี่ยในหินมีอยู่ 13 มิลลิกรัมต่อหิน 1 กิโลกรัม แร่ที่มีตะกั่วผสมอยู่ได้แก่ แร่กาลี (Galena) ซึ่งเป็นซัลไฟด์ของตะกั่ว (PbS), แร่เซอรัสไซท์ (Cerussite, $PbCO_3$), แร่อะไนลีไซท์ (Anglesite, $PbSO_4$), แร่มิเนียม (Minium, $Pb_3O_4$), แร่วุลฟีไนท์ (Wulfenite, $PbMnO_4$), แร่แคลไซต์ (Crocite, $PbCrO_4$) เป็นต้น

ปฏิกิริยาในดิน ตะกั่วในสิ่งแวดล้อม เช่น เมื่อมีการสลายตัวจะถูกออกซิไดส์ ไปอยู่ในรูปของคาร์บอเนตออกไซด์ของเหล็ก อะลูมินัม และในรูปของอินทรียวัตถุ โดยตะกั่วส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป $Pb^{2+}$ มากกว่า $Pb^{4+}$ และมีความเหมือนกับกลุ่มโลหะแอลคาไลท์เอิร์ท (alkaline earth) จึงสามารถเข้าไปแทนที่ธาตุ Mg, Ca, Ba, และ Sr ในแร่และในตำแหน่งที่ธาตุเหล่านี้ถูกดูดซับไว้ ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่สามารถเคลื่อนที่ได้น้อยที่สุด ดินที่มีค่าความเป็นกรดด่างสูงจะทำให้ตะกั่วตกตะกอนอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ ฟอสเฟต และคาร์บอเนต หรืออาจเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ และมีความเสถียรค่อนข้างมาก การเพิ่มความเป็นกรดในดินส่งผลให้ตะกั่วนั้นละลายได้มากขึ้น นอกจากนั่นถ้าดินมีปริมาณอินทรียวัตถุมากก็ส่งผลให้ปริมาณการสะสมของตะกั่วมากขึ้นตามไปด้วย (ศุภมาศ, 2540)

ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ ทางอาหารโดยตะกั่วเข้าสู่ร่างกายทางปากโดยการรับประทานอาหารและน้ำดื่มที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว ทางการหายใจโดยการหายใจเอาควันจากไอเสียรถยนต์ และทางผิวหนังโดยส่วนมากจะเกิดกับบุคคลที่มีอาชีพเกี่ยวข้องกับตะกั่วเป็นส่วนใหญ่ โดยตะกั่วอินทรีย์ถูกดูดซึมเข้าผิวหนังได้ดี มีการสำรวจดิน และฝุ่นบริเวณริมถนน ที่เป็นชุมชนหนาแน่น พบว่ามีปริมาณตะกั่วสูงถึง 7,500 ppm ขณะที่ค่าเฉลี่ยของผิวดินโลกเพียง 5-25 ppm และมีการสุ่มตรวจสีทาอาคารที่วางจำหน่ายตามท้องตลาด พบว่ามีปริมาณตะกั่วเจือปนในประเภทสีน้ำมันเกินกว่าค่ามาตรฐานประเทศไทยแบบสมัครใจของสำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ถึงกว่าร้อยละ 47 ปริมาณสารตะกั่วสูงสุดที่พบคือ 95,000 ppm (มูลนิธิบูรณะนิเวศ, 2556) ปริมาณตะกั่วที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม จะถูกสะสมในดินและแหล่งน้ำ ส่งผลต่อพืช สัตว์ และอาจส่งผลต่อมนุษย์ได้อีกด้วย จากการศึกษาปริมาณของตะกั่วที่สะสมในส่วนต่างๆ ของทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วจากบ้านคลิตี้ กาญจนบุรี พบว่าทานตะวันมีตะกั่วสูงถึง 137.79±20.14 mg/kg และข้าวฟ่างมีตะกั่วสูงถึง 80.73±12.52 mg/kg และปริมาณตะกั่วจะสะสมในรากมากที่สุด (สายชล และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ธนวรรณ, 2556) และจากการศึกษาปริมาณโลหะหนักที่ตกค้างในแปลงปลูกข้าวโพดฝักอ่อนในดินเค็มที่ใช้ปุ๋ยต่างชนิดกัน พบว่าหลังช่วงระยะเก็บเกี่ยวไม่พบปริมาณตะกั่วในดิน เนื่องจากว่าพืชดูดเอาตะกั่วไปสะสมในส่วนต่างๆ (บุณฑริกา และพรพิมล, 2555) และจากการศึกษาการสะสมตะกั่วในมะเขือเทศเชอรี่สายพันธุ์ CH154 ที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วจากบ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี พบว่าตะกั่วมีความเข้มข้นสูงในส่วนราก (วิไลลักษณ์ และธนวรรณ, 2556)

**2.2.4 แคดเมียม (Cadmium, Cd)**

แคดเมียมเป็นโลหะกรุ๊ป 2B ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 48 น้ำหนักอะตอม 112.4 ความถ่วงจำเพาะ 8.642 จุดหลอมเหลว 320.9 องศาเซลเซียส มีความอ่อนตัว บิดโค้งงอและถูกตัดได้ง่ายด้วยมีด มักอยู่ในรูปแท่ง แผ่น เส้นลวด เป็นมันเงา หรือเป็นผงเม็ดละเอียดสีเทาพบในธรรมชาติในรูปของสารประกอบซัลไฟด์ แคดเมียมจะมีลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีคล้ายกับสังกะสี เนื่องจากแคดเมียมอยู่ติดกับสังกะสีในตารางธาตุ แคดเมียมมีความเป็นพิษมาก และแคดเมียมบางรูปละลายน้ำได้ โดยที่แคดเมียมไม่สลายตัวในสิ่งแวดล้อมแต่เปลี่ยนรูปในดิน ในหิน และปุ๋ยจากแร่มีแคดเมียมอยู่บ้างในอากาศที่มีความชื้น แคดเมียมจะถูกออกซิไดซ์ช้าๆ ให้แคดเมียมออกไซด์ (ศราริน, 2549) แคดเมียมเป็นแร่ที่กระจายปนกับแร่ชนิดอื่น และมักปนอยู่กับสังกะสีในปริมาณ 0.1-55 ซึ่งปริมาณแคดเมียมมีมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณสังกะสีในแร่ สำหรับแร่สังกะสีในประเทศไทยที่ขุดได้ในจังหวัดตากมีแคดเมียมประกอบอยู่ 0.23-0.38% (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) และแคดเมียมที่อยู่ในแร่มักอยู่ในรูปสารประกอบ เช่น แคดเมียมออกไซด์ (CdO) แคดเมียมคลอไรด์ ($CdCl_2$) แคดเมียมซัลเฟต ($CaSO_4$) แคดเมียมซัลไฟด์ เป็นต้น

ปฏิกิริยาในดิน แคดเมียมจะเคลื่อนที่ได้ดีในสภาพดินเป็นกรด เมื่อหินและแร่สลายตัวจะพบแคดเมียมในรูป $Cd^{2+}$ เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอาจจะพบอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน (complex ion) และสารประกอบต่างๆ ได้เช่น

แคตไอออน : $CdCl^+$, $CdOH$, $CdHCO_3^+$
แอนไอออน : $CdCl_3^-$, $CdCl_4^{2-}$, $Cd(OH)_3^-$, $Cd(OH)_4^{2-}$
สารประกอบต่างๆ : $CdO$, $CdCO_3$

ค่าความเป็นกรดด่างและศักย์รีดอกซ์เป็นปัจจัยสำคัญในการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดิน ซึ่งจะเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีความเป็นกรด (pH=4.5-5.5) ส่วนการละลายของแคดเมียมในดินขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็ก อะลูมินัม และปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

แคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำอาหาร เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมในกระเพาะอาหาร แล้วแพร่กระจายไปที่ตับ ม้าม และลำไส้ และสะสมเพิ่มขึ้นในปริมาณสูงจะทำให้เกิดมะเร็ง ไตทำงานผิดปกติ ความดันโลหิตสูง ปวดกระดูกสันหลัง แขนขา ซึ่งจะทำให้ไตพิการได้ อาการเฉียบพลัน จากการกิน มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องเสีย ปวดศรีษะ เป็นต้น อาการพิษเรื้อรังจากการหายใจ มีอาการไอ สูญเสียการรับกลิ่น น้ำหนักลด โลหิตจาง (anemia) หายใจลำบาก ตับและไตถูกทำลาย โรคที่เกิดจากพิษของแคดเมียมเรียกว่า โรคอิไต-อิไต (Itai Itai disease) (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2554) แคดเมียมยังเป็นอันตรายต่อสัตว์อีกด้วย เพราะพืชที่สะสมแคดเมียมจะไม่แสดงอาการเป็นออกมา จึงทำให้สัตว์ที่กินพืชที่มีการสะสมแคดเมียมเข้าไปอาจตายได้ เพราะแคดเมียมจะไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ สำหรับมนุษย์ถ้าได้รับแคดเมียมในระยะสั้นจะส่งผลต่อระบบย่อยและปอด ส่วนในระยะยาวจะทำให้มีผลต่อระบบไต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปนเปื้อนของแคดเมียมในเขตพื้นที่ห้วยแม่ตาวที่เกิดจากที่เกิดจากการทำเหมืองแร่สังกะสี บริเวณยอดเขาซึ่งเป็นต้นกำเนิดของแหล่งน้ำที่สำคัญที่ใช้ในการปลูกข้าว จากการสำรวจตะกอนดินในท้องน้ำพบว่ามีปริมาณแคดเมียมสะสม 0.3-2.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตะกอนดิน (Biothai, 2547) โดยธรรมชาติแคดเมียมที่อยู่ในตะกอนดินถ้ามีค่าความเป็นกรดด่างมากกว่า 7.7 จะอยู่ในรูป $Cd_3(PO_4)_2$ และจะอยู่ในรูป $CdCO_3$ เมื่อมีค่าความเป็นกรดด่างน้อยกว่า 7.7 (Sadiq, 1992) ทำให้เกิดการปะปนไปกับกระแสน้ำในลำห้วยจนถึงบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมที่เกิดปัญหา เมื่อเกษตรกรทำการปลูกข้าว แคดเมียมที่สะสมอยู่ในดินจะถูกดึงขึ้นไปสะสมอยู่ในส่วนต่างๆ ของข้าวในรูปไอออน ($Cd^{2+}$) จากการศึกษาการดึงดูดแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนพบว่าในระยะ 6 เดือนอ้อยสามารถสะสมแคดเมียมในส่วนของรากได้สูงที่สุดคือ 193.13 mg/kg ซึ่งจะมากกว่าในส่วนของท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย และใบ (วราภรณ์ และพันธวัศ, 2550)

### 2.2.5 ทองแดง (Cu)

ทองแดงเป็นโลหะกรุ๊ป 1B ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 29 น้ำหนักอะตอม 63.54 เป็นโลหะที่ใช้มากที่สุดโลหะหนึ่งในรูปของโลหะอิสระ เพราะมีสมบัติเยี่ยมหลายประการ เช่น สมบัติการนำไฟฟ้าและทนความร้อนดีเยี่ยม ทนต่อการผุกร่อน แข็งแรง ดึงเป็นเส้นและตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ ส่วนมากพบทั้งในรูปไอ และเกลือของทองแดง การใช้ประโยชน์ของทองแดง เช่น การเชื่อม การบัดกรี โลหะโดยใช้โลหะของทองแดงและนำทองแดงมาใช้เป็นตัวนำความร้อนและตัวนำไฟฟ้าได้ดี เป็นต้น ถึงแม้ทองแดงจะนำมาใช้ประโยชน์มากมายแต่ก็ส่งผลกระทบต่อมนุษย์ได้ ทำให้เกิดการระคายเคืองและอักเสบที่ตา ระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหาร ซึ่งถ้าได้รับในปริมาณมาก จะทำให้เนื้อเยื่อจมูกอักเสบ และทองแดงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดโรคโลหิตจาง (นารี, 2552)

ปฏิกิริยาในดิน แร่ปฐมภูมิของทองแดงส่วนมากเกิดในรูซัลไฟด์ ซึ่งสามารถสลายตัวได้ง่ายถ้าอยู่ในสภาพเป็นกรด ทำให้ทองแดงหลุดออกมาในรูปไอออน ดังนั้นทองแดงจึงสามารถเคลื่อนที่ได้ดีเมื่อเทียบกับโลหะหนักทั่วไป และจากหินและแร่กลายสภาพเป็นดิน ทองแดงที่ทำปฏิกิริยากับแร่และอินทรีสารได้ง่ายจึงตกตะกอนกับแอนไอออนได้หลายชนิด เช่น ซัลไฟด์ คาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ ทองแดงจึงจัดว่าเคลื่อนที่ได้ไม่ดีในดิน ทำให้เมื่อได้รับการปนเปื้อนจากทองแดงจึงมีการสะสมอยู่ในดินบน ทองแดงที่อยู่ในสภาพละลายได้ ส่วนมากจะอยู่ในรูป $Cu^{2+}$ และสามารถพบทองแดงในรูปไอออนและสารประกอบต่างๆ ได้เช่น

แคตไอออน : $Cu^{2+}$, $Cu^{+}$, $Cu(OH)_2^{2+}$

แอนไอออน : $HCuO_2^{-}$, $CuO_2^{2-}$, $Cu(OH)_3^{-}$, $Cu(OH)_4^{2-}$, $Cu(CO_3)_2^{2-}$

สารประกอบต่างๆ : $CuCO_3$, $Cu(OH)_2CO_3$

แร่ในดินที่สามารถดูดซับไอออนของทองแดงได้ ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับประจุตัวดูดซับ ซึ่งการดูดซับทองแดงได้ดีนั้นขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรดด่างของดิน ออกไซด์ของเหล็ก อะลูมินัม และแร่ดินเหนียว (ศุภมาศ, 2540) ทองแดงมีโอกาสเกิดพิษต่อมนุษย์ต่ำ โดยส่วนมากมักส่งผลกระทบต่อพืชได้ง่ายกว่าในรูปสารละลายในดิน มนุษย์สามารถรับทองแดงได้จากการหาย การบริโภคอาหาร หากได้รับทองแดงในปริมาณมากและติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำให้ตับทำงานได้น้อยลง และไม่ขับทองแดงออก ทำให้ร่างกายเกิดภาวะผิดปกติ มีอาการควบคุมการพูดลำบากและมีการสั่นเท้าตลอดเวลา (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2554) ระดับวิกฤตทองแดงในพืชโดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 20-30 mg/kg และในพืชต่างชนิดกันก็มีการความสามารถทนทานทองแดงได้แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช และจากการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบำบัดดินที่ปนเปื้อนทองแดง โดยใช้ผักกาดเขียวปลี ต้อยติ่ง และไมยราบ พบว่าผักกาดมีความสามารถดูดซับทองแดงได้สูงที่สุด เมื่อเทียบกับต้อยติ่ง และไมยราบ และสามารถดูดซับได้ดีในส่วนที่อยู่เหนือดิน (shoot) เท่ากับ 1,700 mg/kg เมื่อเทียบกับส่วนของราก (root) เท่ากับ 1,120 mg/kg และจะดูดซับได้ดีในระยะ 40 วัน ส่วนต้อยติ่งจะดูดซับได้สูงหากมีระยะเวลาที่ยาวนานเมื่อเทียบกับผักกาดเขียวปลี (บัญชาการ, 2548)

**2.2.6 สังกะสี (Zn)**

สังกะสีเป็นโลหะกรุ๊ป 2B ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 30 น้ำหนักอะตอม 65.409 มีลักษณะสีเงิน มันวาว หลอม และขึ้นรูปได้ง่าย มีความทนต่อการเกิดสนิม มีความแข็ง แต่เปราะง่าย ไม่สามารถดัดโค้งงอตามรูปที่ต้องการได้ เนื่องจากเปราะ และมีจุดหลอมเหลวต่ำ นิยมนำมาใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมมากมาย เช่น การชุบโลหะ ภาชนะโลหะเคลือบ ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง ในทางการเกษตรนำมาใช้เป็นสารคลุกเมล็ดพืชป้องกันเชื้อรา (นิธิยา, 2543) โดยทั่วไปสังกะสีพบในธรรมชาติจะไม่พบในรูปของธาตุอิสระ สังกะสีในดินมักพบในรูปของซัลไฟด์ (ZnS) และมักปนกับซัลไฟด์ของโลหะอื่น เช่น เหล็ก ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดง สำหรับสังกะสีที่พบเป็นสินแร่มักพบในรูป แร่เฮมิเมอร์ไฟต์ $[Zn_4(Si_2O_7)(OH)_2(H_2O)]$ แร่สมิทซอไนต์ ($ZnCO_3$) และแร่คิงไซต์ (ZnO) สำหรับแร่สังกะสีที่พบมากที่สุดในโลก คือ แร่สฟาเลอไรต์ (ZnS) (สยามเคมี, 2558)

ปฏิกิริยาในดิน สังกะสีเกิดจากการสายตัวของแร่สังกะสีและได้สังกะสีออกมาในรูป $Zn^{2+}$ สังกะสีสามารถเคลื่อนที่ได้ในดินที่มีสภาพเป็นกรด แต่จะถูกดูดซับโดยแร่และสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่จึงพบการสะสมในดินชั้นบน ส่วนมากจะอยู่ในรูป $Zn^{2+}$ และสามารถพบสังกะสีในรูปของไอออนและสารประกอบต่างๆ ได้แก่

แคตไอออน : $Zn^{2+}$, $ZnCl^{+}$, $ZnOH^{+}$, $ZnHCO_3^{+}$
แอนไอออน : $ZnO_2$, $ZnO_2^{2-}$, $Zn(OH)_3^{-}$
สารประกอบต่างๆ : $Zn(OH)_2$, ZnO, $Zn_3(PO_4)_2.H_2O$, $ZnCO_3$

ตัวกำหนดการเคลื่อนที่ของสังกะสีมีความคล้ายคลึงกับทองแดง แต่สังกะสีจะอยู่ในสภาพละลายได้มากกว่าทองแดง ความเป็นกรดด่างเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สังกะสีในดินละลาย และถูกพืชดูดเคลื่อนย้ายได้ดีเมื่อเป็นดินเนื้อหยาบเมื่อเทียบกับโลหะหนักชนิดอื่น ดังนั้นสังกะสีจะละลายได้ดีในดินที่มีลักษณะเป็นดินกรด และมีเนื้อหยาบการชะละลายจะเกิดสูง (ศุภมาศ, 2540) สังกะสีที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมนั้นเกิดจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม ซึ่งมลพิษที่ปนเปื้อนสังกะสีมักอยู่ในรูปของฝุ่นหรือไอสารที่ลอยในอากาศ ซึ่งมนุษย์มีโอกาสสัมผัสและรับสารได้ง่าย ฝุ่นหรือไอของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) สามารถทำให้เกิดความระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ส่วนการสัมผัสทางผิวหนังเป็นเวลานานจะทำให้เกิดผิวหนังอักเสบอย่างรุนแรง เรียกว่า โรคออกไซด์-พ็อกซ์ (oxide pox) (สยามเคมี, 2558) พืชทั่วไปจะสามารถดูดสังกะสีในรูปไดเวเลนซ์แคตไอออน ($Zn^{2+}$) แต่ถ้าในระดับดินที่มีค่าความเป็นกรดด่างสูงอาจดูดได้ในรูปของโมโนเวเลนซ์แคตไอออน ($ZnOH^{+}$) ระดับความเป็นพิษของสังกะสีในใบพืชทั่วไปจะมีค่าตั้งแต่ 100-500 mg/kg (ใบแห้ง) พืชแต่ละชนิดมีความทนทานต่อพิษของสังกะสีได้แตกต่างกัน โดยพืชที่ไม่ทนต่อพิษของสังกะสีจะมีอาการ คือ รากหยุดการยืดตัว ใบอ่อนจะเหลืองซีด (ยงยุทธ, 2543) และจากการศึกษาการดูดดึงธาตุโลหะหนักของหญ้าแฝกที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว พบว่าความเข้มข้นของสังกะสีในส่วนต่างๆ ของหญ้าแฝก 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายพันธุ์มีการสะสมสังกะสีที่ในดินที่เพิ่มสูงขึ้นก็ทำให้มีประมาณการสะสมสังกะสีเพิ่มสูงขึ้นโดยมีความเข้มข้นสังกะสีเท่ากับ 117.4, 114.7 และ 15.1 mg/kg ตามระดับการปนเปื้อน (สุรัตนา, 2548)

## 2.3 ดิน

ดิน คือ วัตถุตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นจากการผุพังสลายตัวของหินและแร่ต่างๆ ผสมคลุกเคล้ารวมกับอินทรียวัตถุหรืออินทรียสารที่ได้มาจากการสลายตัวของเศษซากพืชและสัตว์จนเป็นเนื้อเดียวกัน เกิดขึ้นปกคลุมพื้นผิวโลกอยู่เป็นชั้นบางๆ และเป็นที่ยึดเหนี่ยวในการเจริญเติบโตของพืช

### 2.3.1 ชนิดและส่วนประกอบของดิน

ชนิดของดิน สามารถแบ่งตามลักษณะของเนื้อดินเป็น 3 ชนิดดังนี้

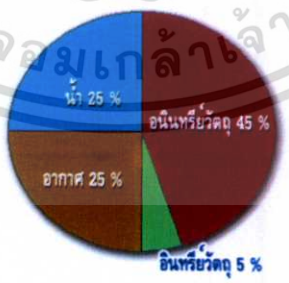
1) ดินเหนียว คือ ดินที่มีเนื้อละเอียดที่สุด มีความยืดหยุ่นเมื่อเปียก เหนียวติดมือ ปั้นเป็นก้อนหรือคลึงเป็นเส้นยาวได้ อุ้มน้ำได้ดี จับยึดและแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชได้สูง หรือค่อนข้างสูงจึงมีธาตุอาหารอยู่มากเหมาะที่จะใช้ทำนาปลูกข้าวเพราะเก็บน้ำได้นาน

2) ดินทราย คือ ดินที่เกาะตัวกันไม่แน่น ระบายน้ำและอากาศดีมาก มีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ เพราะความสามารถในการจับยึดธาตุอาหารพืชมีน้อย พืชที่ขึ้นอยู่บริเวณดินทรายจึงมักขาดทั้งอาหารและน้ำได้ง่าย

3) ดินร่วน คือ ดินที่มีเนื้อค่อนข้างละเอียด นุ่มมือ ยืดหยุ่นพอสมควร ระบายน้ำได้ดีปานกลาง มีแร่ธาตุอาหารมากกว่าดินทราย เหมาะสำหรับใช้ในการเพาะปลูกซึ่งไม่ค่อยพบในธรรมชาติ แต่จะพบดินที่มีเนื้อดินใกล้เคียงกันมากกว่า

### 2.3.2 ส่วนประกอบของดินสามารถจำแนกได้เป็น 4 ส่วน (รูปที่ 2.3)

1) อนินทรียวัตถุหรือแร่ธาตุ เป็นส่วนที่สลายมาจากวัตถุให้กำเนิดดิน เช่น หินหรือแร่ธาตุ ซึ่งแร่ธาตุนั้นนับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของดินซึ่งมีอยู่มากมายหลายชนิด และจะผันแปรไปตามชนิดของดิน




**รูปที่ 2.3** ส่วนประกอบของดิน (ปรียานุช, 2018)

2) อินทรียวัตถุ เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดของธาตุอาหารของพืชที่เกิดจากการเน่าเปื่อยผุพังของซากพืชและสัตว์ที่ทับถมกันอยู่บนดินโดยจุลินทรีย์ อินทรียวัตถุเป็นส่วนประกอบที่บอกความอุดมสมบูรณ์ของดิน เพราะนอกจากเป็นสารอาหารของพืชแล้ว ยังทำให้เกิดสภาพกรดอ่อนที่เหมาะสมต่อการละลายของแร่ธาตุในดินที่เป็นธาตุอาหารสำหรับพืชอีกด้วยรวมทั้งสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่อาศัยหรือเจริญเติบโตอยู่ในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) น้ำ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของดินที่พบอยู่รอบๆ อนุภาคดินและในช่องว่างระหว่างอนุภาคของดิน (pore space) น้ำในดินทำหน้าที่เป็นแหล่งน้ำสำหรับพืชและจุลินทรีย์ในดิน อีกทั้งเป็นตัวทำละลายธาตุอาหารต่างๆ ในดินซึ่งช่วยให้พืชสามารถนำไปใช้ได้

4) อากาศ ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน และออกซิเจน ซึ่งจะแทรกอยู่ตามที่ว่างในดินระหว่างอนุภาคดิน ก๊าซแต่ละชนิดมีความสำคัญต่างกันไป ดังนี้คือออกซิเจนเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในการหายใจของพืชและจุลินทรีย์ ก๊าซไนโตรเจนในอากาศจะถูกเปลี่ยนเป็นเกลือไนเตรทซึ่งเป็นธาตุอาหารพืชโดยแบคทีเรียที่สามารถตรึงไนโตรเจน

สัดส่วนของแต่ละส่วนประกอบของดินที่เหมาะสมแก่การเพาะปลูกพืช โดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบ ประกอบด้วยอนินทรีย์ (แร่ธาตุ) ร้อยละ 45 อินทรียวัตถุร้อยละ 5 น้ำร้อยละ 25 และอากาศร้อยละ 25

**2.3.3 คอลลอยด์ในดิน** (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ดินที่อยู่ในสารละลายประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆ อินทรียวัตถุที่มีขนาดเล็กมากและสามารถแขวนลอย ซึ่งมีอนุภาคเล็กประมาณ 0.2-0.5 ไมครอน สารคอลลอยด์ในดินแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ คอลลอยด์ที่เป็นสารอินทรีย์ (organic colloid) คอลลอยด์ประเภทนี้ คือ ส่วนที่หลงเหลือจากซากพืชซากสัตว์ที่ถูกย่อยสลายแล้ว ส่วนนี้จะทนทานต่อการสลายตัวหรือสลายตัวได้ช้ามาก เรียกว่า ฮิวมัส (humus) คอลลอยด์ที่เป็นสารอนินทรีย์ (inorganic colloid) คอลลอยด์ประเภทนี้ คือ ส่วนที่ได้จากการสลายตัวของแร่ธาตุ ซึ่งจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของไอออนและอนุมูลต่างๆ และส่วนที่ปลดปล่อยออกมานี้อาจตกผลึก หรือทำปฏิกิริยารวมตัวกันใหม่เป็นผลึกบางๆ มีขนาดเล็กมาก เรียกว่า แร่ดินเหนียว (clay mineral) แร่ดินเหนียวแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมินัม และซิลิเกตเคลย์หรืออะลูมิโนซิลิเกต

2.3.3.1 สมบัติที่สำคัญของซิลิเกตเคลย์ (Silicate clay)

ซิลิเกตเคลย์หรืออะลูมิโนซิลิเกตเป็นคอลลอยด์ที่มีอยู่ในดินมากที่สุดในโครงสร้างของแร่ดินเหนียว มีสมบัติดังต่อไปนี้

1) ลักษณะของซิลิเกตเคลย์ เป็นแผ่นบางๆ ซ้อนกันอยู่เป็นจำนวนมาก อนุภาคของแร่ดินเหนียวส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นผลึกบางๆ มีรูปร่างหกเหลี่ยม (hexagonal) ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ส่วนแร่ดินเหนียวบางชนิดมีรูปร่างเป็นม้วนก็มีขนาดของพวกซิลิ-เกตเคลย์จะอยู่ระหว่าง 0.01-5.0 ไมครอน

2) พื้นที่ผิว (surface area) มีขนาดเล็กมากและเป็นแผ่นแบนและบางจึงทำให้มีพื้นที่ผิวสูง นอกจากนี้ซิลิเกตเคลย์ยังมีพื้นที่ผิวภายในซึ่งอยู่ตามหลืบระหว่างแผ่นผลึกของซิลิเกตเคลย์ที่ซ้อนทับกันอยู่เป็นอนุภาคทำให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุดเมื่อเทียบกับทรงกลมและลูกบาศก์

3) ความเหนียว (cohesion) และอ่อนตัว (plasticity) ความเหนียว หมายถึงความสามารถเกาะยึดกันได้ระหว่างอนุภาคของดินเหนียวเมื่อดินเหนียวมีความชื้นที่เหมาะสมจะมีความอ่อนนุ่ม สามารถบีบปั้นให้เป็นรูปต่างๆ ได้ จะเห็นได้ว่าความเหนียวและความอ่อนตัวจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของดินเหนียวเป็นอย่างมาก ถ้าดินเหนียวมีพื้นที่ผิวมาก น้ำก็เกาะยึดอยู่ได้มาก ทำให้อนุภาคของดินเหนียวเกาะติดกันได้ดี และมีความอ่อนตัว มีสภาพเหนียวเกาะติดมือ และไถพรวนทำได้ลำบาก ตรงข้ามถ้าหากดินเหนียวมีพื้นที่ผิวน้อยถึงแม้จะมีความชื้นมากก็ไปทำให้ดินเหนียวไม่สามารถเกาะติดกับดินเหนียวอนุภาคอื่นได้ดี ทำให้ดินมีสภาพร่วนไม่เหนียว และไถพรวนได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การขยายตัว (swelling) และการหดตัว (shrinking) การขยายตัวและการหดตัวขึ้นอยู่กับช่องว่างหรือหลืบระหว่างแผ่นผลึกที่ซ้อนทับ เมื่อน้ำเข้าไปในหลืบมากขึ้นจะทำให้หลืบระหว่างดินเหนียวอ้ามากขึ้นทำให้ดินเหนียวเมื่อเปียกน้ำเกิดการพองหรือขยายตัว แต่เมื่อน้ำในหลืบระเหยออกไปก็จะทำให้หลืบของดินเหนียวนั้นยุบตัวลงทำให้เกิดการหดตัว ยกตัวอย่างเช่นดินในท้องนาหน้าร้อน ดินจะแตกระแหงเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียว ส่วนหน้าฝนดินจะชื้นรอยแตกระแหงจะหายไปเนื่องจากดินเกิดการพองหรือขยายตัว

5) ประจุลบ (electronegative charge) และการยึดไอออนบวก (adsorption of cation) บริเวณผิวของอนุภาคดินเหนียว จะมีประจุลบอยู่จำนวนมากเมื่อดินเหนียวอยู่ในสภาพแขวนลอยจะมีอนุภาคของน้ำและแคตไอออนมาเกาะอยู่ที่ดินเหนียวเต็มไปหมดเรียกสภาวะนี้ว่าเคลย์ไมเซลล์ (clay micelle) ไอออนบวกที่ถูกยึดอยู่ที่ผิวของดินเหนียวจะถูกยึดแบบหลวมๆ สามารถถูกไล่ที่ได้ด้วยแคตไอออนชนิดอื่นๆ ได้ ซึ่งเรียกแคตไอออนพวกนี้ว่า แคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable cation) ดินส่วนใหญ่พบว่ามีแคตไอออน พวกไฮโดรเจนไอออน โพแทสเซียมไอออน โซเดียมไอออน แมกนีเซียมไอออน และแคลเซียมไอออนเกาะที่ผิวของดินเหนียว

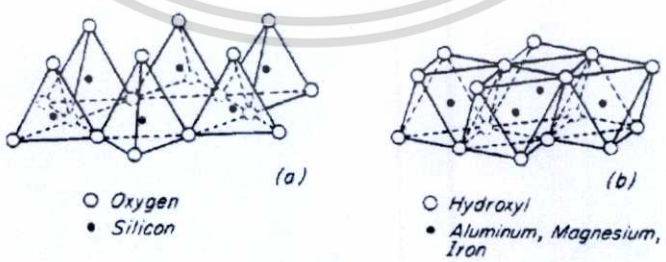
6) โครงสร้างและชนิดของซิลิเกตเคลย์ นักวิทยาศาสตร์สามารถหาโครงสร้างของซิลิเกตเคลย์โดยใช้รังสีเอกซ์

2.3.3.2 โครงสร้างของซิลิเกตเคลย์

คุณสมบัติที่สำคัญในการกำหนดโครงสร้างของซิลิเกตเคลย์ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพที่ประกอบด้วย พื้นที่ผิว ความเหนียว ความอ่อนตัว และการขยายตัว รวมทั้งคุณสมบัติทางเคมีได้แก่ ไอออนลบที่อยู่บริเวณผิวของซิลิเกตเคลย์ ซึ่งจะมีไอออนบวกต่างๆ เช่น ไฮโดรเจนไอออน และโซเดียมไอออนเป็นต้น มาเกาะบริเวณผิวของซิลิเกตเคลย์เป็นจำนวนมาก ซิลิเกตเคลย์ประกอบด้วย

1) หน่วยที่สำคัญของผลึกเคลย์

1.1) หน่วยของซิลิกาเตตระฮีดรัล (silica tetrahedral unit) ประกอบด้วยธาตุซิลิกา 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยธาตุออกซิเจน 4 อะตอม เกิดเป็นรูปทรงที่มีสี่ด้าน เรียกว่า หน่วยของเตตระฮีดรัล (tetrahedral unit) ทำให้เกิดเป็นแผ่นคล้ายรังผึ้ง คือจะเป็นแผ่นที่มีช่วงรูปหกเหลี่ยมอยู่ทั่วไป เรียกว่า แผ่นของซิลิกาเตตระฮีดรัล (silica tetrahedral sheet) หรือเรียกว่าแผ่นซิลิกา (silica sheet) ดังรูปที่ 2.4




**รูปที่ 2.4** โครงสร้างของซิลิกาเตตระฮีดรัล และอลูมินาออกตาฮีดรัล (Grim, 1968)

1.2) หน่วยของอลูมินาออกตาฮีดรัล (alumina octahedral unit) ประกอบด้วยธาตุอลูมินัม 1 อะตอม อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอม ทำให้เกิดเป็นรูปทรงที่มีแปด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านขึ้น เรียกว่า แผ่นอลูมินาออกตาฮีดรัล (alumina octahedral sheet) หรือแผ่นอลูมินา (alumina sheet) ดังรูปที่ 2.4

ซิลิเกตเคลย์ทุกชนิดประกอบด้วยหน่วยโครงสร้างดังกล่าวแทบทั้งสิ้น ซิลิเกตเคลย์ชนิดต่างๆ เกิดขึ้นจากการเรียงทับซ้อนของแผ่นซิลิกา และแผ่นอลูมินา และการแลกเปลี่ยนแทนที่ของซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al)

**2.3.4 สมบัติของดิน**

2.3.4.1 สมบัติทางกายภาพ

ดินต้องมีโครงสร้างที่ดี มีการร่วนซุย อากาศถ่ายเทได้ดี มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดี เม็ดดินเกาะกันอย่างหลวมๆ เพื่อช่วยให้รากพืชสามารถแผ่ขยาย และชอนไชไปหาแร่ธาตุอาหารพืชได้ง่าย เป็นดินที่อ่อนนุ่มไม่แข็งกระด้าง เป็นลักษณะภายนอกของดินที่สามารถมองเห็นและจับต้องหรือสัมผัสได้

1) หน้าตัดดินและชั้นดิน นักวิทยาศาสตร์ทางดินหรือนักปฐพีวิทยา เรียกผิวด้านข้างของหลุมดินที่ตัดลงไปจากผิวหน้าดินตามแนวดิ่งซึ่งปรากฏให้เห็นชั้นต่างๆ ภายในดินนี้ว่า หน้าตัดดิน (soil profile) และเรียกชั้นต่างๆ ในดินที่วางตัวขนานกับผิวหน้าดินว่า ชั้นดิน (soil horizon) การศึกษาหน้าตัดดินมักจะทำกันในช่วงความลึกตั้งแต่ผิวหน้าดินลงไปประมาณ 2 เมตร ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาลักษณะที่ปรากฏอยู่ในหน้าตัดดินบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ประกอบกับข้อมูลผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินบนและดินล่าง จะทำให้เราสามารถแบ่งชนิดของดินออกเป็นกลุ่มและจัดหมวดหมู่ดินได้

ในหน้าตัดของดิน ประกอบด้วยชั้นต่างๆ มากมาย โดยที่ชั้นเหล่านี้อาจเป็นชั้นที่เกิดจากกระบวนการทางดิน หรือเป็นชั้นของวัสดุต่างๆ ก็ได้ ชั้นดินมีอยู่ด้วยกัน 5 ชั้น คือ ชั้น O, A, E, B และ C แต่ในบางหน้าตัดดินอาจพบ ชั้น R ซึ่งเป็นชั้นหินพื้นที่อาจจะมีความเกี่ยวข้องกับชั้นดินหลักตอนบนหรือไม่ก็ได้ การสังเกตความแตกต่างของลักษณะที่ปรากฏอยู่ในแต่ละชั้นดิน และการเรียงตัวของชั้นดินที่ในหน้าตัดดินนี้เอง ที่ทำให้นักปฐพีวิทยาสามารถจัดแบ่งดินที่พบออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการให้คำแนะนำแก่เกษตรกรในการใช้ประโยชน์ที่ดินได้อย่างเหมาะสมกับดินในพื้นที่นั้นๆ

“ชั้น O” หรือเรียกว่า ชั้นดินอินทรีย์ คือ ชั้นที่มีการสะสมอินทรียวัตถุทั้งที่มาจากพืชและสัตว์ ซึ่งส่วนใหญ่มักจะมาจากพืช เช่น ใบไม้ กิ่งไม้ หญ้า และพืชอื่นๆ ทั้งพวกที่มีการสลายตัวเพียงเล็กน้อย สลายตัวปานกลาง หรือสลายตัวมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นลักษณะของชิ้นส่วนดั้งเดิม

“ชั้น A” หรือ ชั้นดินบน ชั้นดินที่ประกอบด้วยอินทรียวัตถุที่สลายตัวแล้วผสมคลุกเคล้าอยู่กับแร่ธาตุในดิน มักมีสีคล้ำ

“ชั้น E” หรือ ชั้นชะล้าง เป็นชั้นดินที่มีสีซีดจาง มีปริมาณอินทรียวัตถุน้อยกว่ากว่าชั้น A และมักจะมีเนื้อดินหยาบกว่าชั้น B ที่อยู่ตอนล่างลงไป

“ชั้น B” หรือ ชั้นดินล่าง เป็นชั้นที่แสดงถึงการเคลื่อนย้ายมาสะสมของวัสดุต่างๆ เช่น อนุภาคดินเหนียว

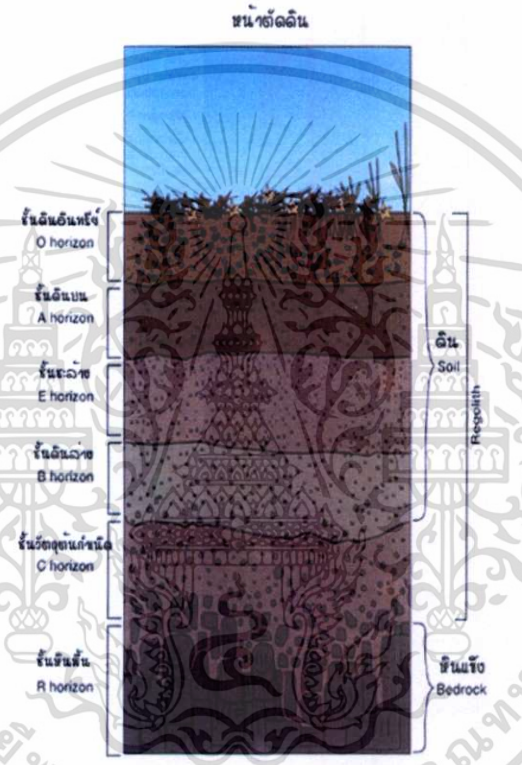
“ชั้น C” หรือ ชั้นวัตถุต้นกำเนิดดิน เป็นชั้นของวัสดุที่เกาะตัวกันอยู่หลวมๆ อยู่ใต้ชั้นที่เป็นดิน ประกอบด้วยหินและแร่ที่กำลังผุพังสลายตัว ชั้นหินพื้นฐาน ซึ่งเป็นชั้นของหินแข็งที่ยังไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการผุพังสลายตัวอยู่ในหน้าตัดดินด้วย

"ชั้น R" หรือ ชั้นหินพื้น เป็นชั้นหินแข็งที่ยังไม่ผุพังสลายตัว อาจจะมีหรือไม่มีในหน้าตัดดินก็ได้

2) สีของดิน เป็นสมบัติของดินที่สะท้อนถึงสภาพแวดล้อม กระบวนการเกิดดิน แร่ที่เป็นองค์ประกอบของดิน หรือวัสดุอื่นที่อยู่ในดิน สีของดิน มีหลายสี ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงสีดำ น้ำตาล แดง เหลือง เหลืองแดง เหลืองเทา และสีเทา การสังเกตสีของดิน ทำให้เราสามารถประเมินสมบัติทางกายภาพและเคมีบางอย่างของดินได้ เช่น สภาพการระบายน้ำของดิน ระดับน้ำใต้ดิน หรือ ความอุดมสมบูรณ์ของดิน




**รูปที่ 2.5** หน้าตัดดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

3) เนื้อดิน เป็นสมบัติที่บอกถึงความหยาบหรือละเอียดของชิ้นส่วนเล็กๆ ของดิน ที่เราเรียกว่า "อนุภาคของดิน" ซึ่งอนุภาคเหล่านี้จะมีขนาดไม่ท่ากัน แบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ขนาดใหญ่เรียกว่าอนุภาคขนาดทราย (2.0-0.05 มิลลิเมตร) ขนาดกลางเรียกว่าอนุภาคขนาดทรายแป้ง (0.05-0.002 มิลลิเมตร) และขนาดเล็กที่สุดคืออนุภาคดินเหนียว (< 0.002 มิลลิเมตร) การรวมตัวกันของอนุภาคขนาดทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดเป็นเนื้อดินชนิดต่างๆ ขึ้นมา ในการจำแนกประเภทของเนื้อดินนั้นจะถือเอาเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคขนาดเหล่านี้ที่มีอยู่ในดินนั้นๆ เป็นหลัก โดยทั่วไปเนื้อดินอาจแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 กลุ่มคือ ดินทราย ดินร่วน และดินเหนียว

4) โครงสร้างของดิน เป็นสมบัติของดินที่เกิดขึ้นจากการเกาะจับกันของอนุภาคที่เป็นของแข็งในดิน (ส่วนที่เป็นแร่ธาตุหรืออนินทรียสารและอินทรียวัตถุ) เกิดเป็นเม็ดดินหรือเป็นก้อนดินที่มีขนาด รูปร่าง และความคงทนแข็งแรงในการยึดตัวต่างๆ กัน โครงสร้างของดินมีผลต่อการซึมผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของน้ำที่ผิวดิน การอุ้มน้ำ ระบายน้ำ และการถ่ายเทอากาศในดิน รวมถึงการแพร่กระจายของรากพืช ด้วย โครงสร้างดิน อาจเกิดจากแรงเกาะยึดกันระหว่างอนุภาคในดิน การที่ดินแห้งและเปียก การแข็งตัวเมื่อมีอากาศหนาวจัด หรือการละลายของหิมะ นอกจากนี้ รากพืช กิจกรรมของสัตว์ที่อาศัยอยู่ในดิน อินทรียวัตถุ และสารอื่นๆ ที่มีในดิน สามารถที่จะเป็นตัวเชื่อมให้เกิดโครงสร้างดินได้เช่นกัน

2.3.4.2 สมบัติทางเคมี

1) สภาพความเป็นกรดด่างของดิน หรือปฏิกิริยาดิน คือสมบัติของดินที่แสดงว่าดินเป็นกรดหรือด่าง และสภาพกรดหรือด่างนั้นมีความรุนแรงมากหรือน้อยเพียงใด สภาพกรด-ด่างของดินหรือปฏิกิริยาดินเป็นสมบัติทางเคมีที่สำคัญมาก เนื่องจากเกี่ยวข้องกับความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารที่มีอยู่เดิมและปุ๋ยที่ใส่ในดิน

2) ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดินหรือค่า CEC (Cation Exchange Capacity) เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวและฮิวมัสในดินมีประจุลบจึงสามารถดูดซับแคตไอออน เช่น โพแทสเซียมไอออน แคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนซึ่งมีประจุบวกไว้ที่ผิว มีผลดี คือ แคตไอออนที่อนุภาคดินดูดซับไว้นี้ยังคงเป็นประโยชน์ต่อพืช และช่วยดูดซับให้ไอออนดังกล่าวคงอยู่กับดินไม่ถูกน้ำชะล้างเมื่อฝนตกหรือมีการรดน้ำ ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) ของดินแตกต่างกันตามเนื้อดินและปริมาณอินทรียวัตถุในดิน กล่าวคือ ดินเนื้อละเอียดมีดินเหนียวมากจึงมีประจุลบที่ผิวมาก ทำให้ดูดซับแคตไอออนได้มากกว่าดินเนื้อหยาบซึ่งมีปริมาณดินเหนียวน้อยกว่า แต่ถ้าดินมีเนื้อดินแบบเดียวกัน ดินที่มีอินทรียวัตถุสูงกว่าก็สามารถดูดซับแคตไอออนได้มากกว่าด้วย เนื่องจากในอินทรียวัตถุมีฮิวมัสมากและที่ผิวของฮิวมัสมีประจุลบมากเป็นพิเศษ

3) ความเค็มของดิน ความเค็มของดินเกิดขึ้นเมื่อดินนั้นสะสมเกลือที่ละลายได้ง่ายในปริมาณที่สูงเกินไป เกลือที่มักสะสมในดิน ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง) แคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ และโซเดียมซัลเฟต

**2.3.5 ลักษณะดินจังหวัดระยอง**

สภาพโดยทั่วไปเป็นที่ราบสลับที่ดอนเป็นลูกคลื่น ประกอบด้วยภูเขาเตี้ยๆ ด้านเหนือและตะวันออกเป็นที่ราบสลับภูเขาลาดต่ำลงสู่อ่าวไทย ทิศใต้เป็นดินร่วนปนทราย ระบายน้ำได้ดี มีชายฝั่งทะเลติดอ่าวไทยยาวประมาณ 100 เมตร มีแม่น้ำสำคัญ 2 สาย ได้แก่ แม่น้ำระยอง และแม่น้ำประแสร์

2.3.5.1 กลุ่มชุดดิน อำเภอเมือง จังหวัดระยอง

เป็นกลุ่มชุดดินที่ 6 เรียกว่าชุดดินบางนารา เนื้อดินเป็นดินเหนียว ร่วนปนเหนียว หรือเหนียวปนทราย ดินบนมีสีเทาหรือเทาปนน้ำตาล ดินล่างมีสีน้ำตาลอ่อนหรือเทา จุดปะสีเหลือง หรือน้ำตาลตลอดชั้นดิน พบตามที่ราบเรียบหรือค่อนข้างราบเรียบ เป็นดินลึก มี pH 5.5-6.5 ปฏิกิริยาดินค่อนข้างเป็นกรดจัดมาก การระบายน้ำค่อนข้างต่ำ เหมาะสำหรับการทำนา

## 2.4 ข้าว

**2.4.1 พฤกษศาสตร์ทั่วไป**

ข้าวเป็นพืชล้มลุกที่มีใบเลี้ยงเดี่ยว เป็นอาหารหลักของประชากรโลก จัดเป็นพืชสายพันธุ์เดียวกับหญ้า ซึ่งนับได้ว่าเป็นหญ้าที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลก และมีความหลากหลายทางชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถปลูกขึ้นได้ง่ายมีความทนทานต่อทุกสภาพภูมิประเทศในโลก ไม่ว่าจะเป็นถิ่นแห้งแล้งแบบทะเลทราย พื้นที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง หรือแม้กระทั่งบนเทือกเขาที่หนาวเย็น พันธุ์ที่รู้จักและนำมาปลูกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ Oryza Savita ที่นิยมเพาะปลูกในทวีปเอเชีย และ Oryza glaberrina ที่นิยมเพาะปลูกในทวีปแอฟริกา ข้าวเอเชียที่นิยมปลูกและค้าขายกันในปัจจุบัน แบ่งตามลักษณะและพื้นที่ปลูกเป็น 3 กลุ่มได้ดังนี้

2.4.1.1 ข้าวอินดิกา (Indica) หรือข้าวเจ้า เม็ดเรียวยาวรี ลำต้นสูง ผลผลิตค่อนข้างต่ำ นิยมเพาะปลูกในทวีปเอเชียเขตมรสุม เช่น จีน เวียดนาม ฟิลิปปินส์ ไทย อินโดนีเซีย อินเดีย และศรีลังกา เฉพาะในเมืองไทยนิยมปลูก ในบริเวณที่ราบลุ่มตอนใต้ของแม่น้ำเจ้าพระยา เพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วแทนข้าวเหนียวที่เคยปลูก

2.4.1.2 ข้าวจาปอนิกา (Japonica) เป็นข้าวเหนียวเมล็ดป้อม กลมรี ผลผลิตสูง นิยมปลูกในเขตกึ่งร้อนหรือเขตอบอุ่น เช่น ญี่ปุ่น เกาหลี รัสเซีย ยุโรป และอเมริกา

2.4.1.3 ข้าวจาวานิกา (Javanica) เมล็ดป้อมใหญ่ ค่อนข้างอ้วน ผลผลิตต่ำ นิยมเพาะปลูกในอินโดนีเซีย และฟิลิปปินส์

**2.4.2 ลักษณะที่สำคัญของข้าว**

ลักษณะที่สำคัญของข้าวแบ่งออกได้เป็นลักษณะที่เกี่ยวกับการเจริญเติบโต และลักษณะที่เกี่ยวกับการขยายพันธุ์ ดังนี้

2.4.2.1 ลักษณะที่เกี่ยวกับการเจริญเติบโต

1) ราก เป็นส่วนที่อยู่ใต้ผิวดิน ใช้ยึดลำต้นกับดินเพื่อไม่ให้ต้นล้ม แต่บางครั้งก็มีรากพิเศษเกิดขึ้นที่ข้อซึ่งอยู่เหนือพื้นดินด้วย ต้นข้าวไม่มีรากแก้ว แต่มีรากฝอยแตกแขนงกระจายแตกแขนงอยู่ใต้ผิวดิน

2) ลำต้น มีลักษณะเป็นโพรงตรงกลางและแบ่งออกเป็นปล้องๆ โดยมีข้อกั้นระหว่างปล้อง ความยาวปล้องนั้นแตกต่างกัน จำนวนปล้องจะเท่ากับจำนวนใบของต้นข้าว ปกติมีประมาณ 20-25 ปล้อง

3) ใบ ต้นข้าวมีใบไว้สำหรับสังเคราะห์แสง เพื่อเปลี่ยนแร่ธาตุ อาหาร น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นแป้ง เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างเมล็ดของต้นข้าว ใบประกอบด้วยกาบใบและแผ่นใบ

2.4.2.2 ลักษณะที่เกี่ยวกับการขยายพันธุ์

1) รวงข้าว หมายถึง ช่อดอกของข้าว ซึ่งเกิดขึ้นที่ข้อปล้องอันสุดท้ายของต้นข้าว ระยะระหว่างข้ออันบนของปล้องอันสุดท้ายกับข้อต่อของใบธง เรียกว่า คอรวง

2) ดอกข้าว หมายถึง ส่วนที่เกสรตัวผู้และเกสรตัวเมียสำหรับผสมพันธุ์ดอกข้าวประกอบด้วยเปลือกนอกใหญ่สองแผ่นประสานกัน เพื่อห่อหุ้มส่วนที่อยู่ภายในไว้ เปลือกนอกใหญ่แผ่นนอก เรียกว่า เลมมา (lemma) ส่วนเปลือกนอกใหญ่แผ่นใน เรียกว่า พาเลีย (palea) ทั้งสองเปลือกนี้ภายนอกของมันอาจมีขนหรือไม่มีขนก็ได้

3) เมล็ดข้าว หมายถึง ส่วนที่เป็นแป้งที่เรียกว่าเอ็นโดสเปิร์ม และส่วนที่เป็นคัพภะ ซึ่งห่อหุ้มไว้โดยเปลือกนอกใหญ่สองแผ่น เอ็นโดสเปิร์มเป็นแป้งที่เราบริโภค คัพภะเป็นส่วนที่มีชีวิตและงอกออกมาเป็นต้นข้าวเมื่อเอาไปเพาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.4.3 การจำแนกชนิดข้าว**

พันธุ์ข้าวที่นำมาปลูกเพื่อบริโภคนั้นมีลักษณะแตกต่างกันไปมากมายตามความต้องการของผู้บริโภค ลักษณะพื้นที่และสภาพแวดล้อม ข้าวในประเทศไทยสามารถถูกจำแนกได้ดังนี้ (บริบูรณ์, 2540; นิรนาม, 2548 ก.)

2.4.3.1 การจำแนกตามคุณสมบัติทางเคมีภายในเมล็ด

1) ข้าวเจ้า (non-glutinous rice) ประกอบด้วย amylopectin ประมาณร้อยละ 60-90 และ amylose ประมาณร้อยละ 15-30

2) ข้าวเหนียว (glutinous rice) ประกอบด้วย amylopectin ประมาณร้อยละ 99 และ amylose พบน้อยหรือไม่พบเลย

2.4.3.2 การจำแนกตามสภาพพื้นที่ปลูก

1) ข้าวไร่ (Upland rice) เป็นข้าวที่ปลูกได้ทั้งบนที่ราบและที่ลาดชันไม่ต้องทำคันนาเก็บกักน้ำ ไม่มีน้ำขังบนผิวดิน ปลูกโดยวิธีหยอดหรือโรยเมล็ดแห้งลงในดินโดยตรง นิยมปลูกกันมากในบริเวณที่ราบสูงตามไหล่เขา การจำแนกตามลักษณะความไวต่อช่วงแสง

2) ข้าวนาสวน (Lowland rice) ข้าวซึ่งปลูกในสภาพนาที่มีน้ำขัง มีการทำคันนาเพื่อกักเก็บน้ำ โดยอาศัยน้ำฝนตามธรรมชาติตลอดฤดูปลูก ระดับน้ำโดยทั่วไปไม่เกิน 50 เซนติเมตร แต่บางครั้งน้ำในนาอาจจะแห้งหรือมีระดับน้ำสูงกว่านี้ ขึ้นกับปริมาณของน้ำฝน

3) ข้าวขึ้นน้ำ (Floating rice) ข้าวซึ่งปลูกในแหล่งที่มีระดับน้ำสูงไม่เกิน 1 เมตร และเมื่อระดับน้ำสูงเกิน 1 เมตร ต้นข้าวจะมีการเจริญเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วหนีน้ำได้ทันในระยะ 1-3 เดือนแรก ทำให้ต้นข้าวมีการยืดยาวตามระดับน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น

2.4.3.3 การจำแนกตามอายุการเก็บเกี่ยว

1) ข้าวเบา มีอายุการเก็บเกี่ยว 90-100 วัน

2) ข้าวกลาง มีอายุการเก็บเกี่ยว 100-120 วัน

3) ข้าวหนัก มีอายุการเก็บเกี่ยว 120 วันขึ้นไป

2.4.3.4 การจำแนกตามลักษณะความไวแสง

1) พันธุ์ข้าวไวต่อความยาวของช่วงแสง (photoperiod sensitive rice variety) ปกติข้าวเป็นพืชวันสั้น (short-day plant) ซึ่งต้องการสภาพช่วงวันหรือช่วงแสงสั้น ในขณะที่มีการเจริญเติบโตในระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการกระตุ้นให้มีการสร้างและออกดอกหรือรวงข้าว

2) พันธุ์ข้าวไม่ไวต่อความยาวของช่วงแสง (photoperiod insensitive rice variety) เป็นข้าวที่มีการออกดอกตามอายุ ซึ่งนับเป็นจำนวนวันตั้งแต่วันตกกล้าถึงวันออกรวง และจะเก็บเกี่ยวได้ภายหลังจากออกรวงประมาณ 30 วัน ซึ่งมักมีอายุตั้งแต่ 90-140 วัน สามารถปลูกได้ตลอดปีและนิยมปลูกในนาปรังที่มีน้ำเพียงพอต่อการ

2.4.3.5 การจำแนกตามรูปร่างของเมล็ดข้าว

1) ข้าวเมล็ดสั้น (Short grain) ความยาวของเมล็ดไม่เกิน 5.50 มิลลิเมตร

2) ข้าวเมล็ดยาวปานกลาง (Medium grain) ความยาวของเมล็ดตั้งแต่ 5.51-6.60 มิลลิเมตร

3) ข้าวเมล็ดยาว (Long grain) ความยาวของเมล็ดตั้งแต่ 6.61-7.50 มิลลิเมตร

4) ข้าวเมล็ดยาวมาก (Extra-long grain) ความยาวของเมล็ดตั้งแต่ 7.51 มิลลิเมตรขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.6 การจำแนกตามฤดูกาล

1) ข้าวนาปีหรือข้าวนาน้ำฝน คือ ข้าวที่ปลูกในฤดูการทำนาปกติ เริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงตุลาคม และเก็บเกี่ยวเสร็จสิ้นไม่เกินเดือนกุมภาพันธ์

2) ข้าวนาปรัง คือ ข้าวที่ปลูกนอกฤดูกาลทำนาปกติ เริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม ในบางท้องที่จะเก็บเกี่ยวอย่างช้าสุดไม่เกินเดือนเมษายน นิยมปลูกในเขตชลประทานภาคกลาง

**2.4.4 พันธุ์ข้าว**

ข้าวที่ปลูกในประเทศไทยเป็นข้าวอินดิกา ซึ่งแบ่งออกเป็นข้าวเจ้าและข้าวเหนียว นอกจากนี้ข้าวยังได้ถูกมนุษย์คัดสรรและปรับปรุงพันธุ์มาโดยตลอดตั้งแต่มีประวัติศาสตร์การเพาะปลูกข้าวในปัจจุบัน จึงมีหลายพันธุ์ทั่วโลกที่ให้รสชาติและประโยชน์ใช้สอยต่างกันไป พันธุ์ข้าวที่มีชื่อของไทยคือข้าวหอมมะลิ

2.4.4.1 ข้าวปทุมธานี 1 (พันธุ์ข้าวที่ใช้ในงานวิจัย)

ปทุมธานี 1 ได้มากจากการผสมพันธุ์ระหว่าง สายพันธุ์ข้าว BKNA6-183-2 (พันธุ์แม่) กับสายพันธุ์ PTT8506-3-21 ที่ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี เมื่อฤดูนาปรังปี 2553 กรมวิชาการเกษตรพิจารณาให้เป็นพันธุ์รับรอง โดยให้ชื่อ “ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1” ลักษณะเด่นของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 คือ เป็นข้าวเจ้าหอมที่ไม่ไวต่อช่วงแสง สามารถที่จะนำเอาไปปลูกได้ตลอดทั้งปี คุณภาพของเมล็ดคล้ายพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เมื่อเวลาข้าวสุกจะนุ่มเหนียว และมีกลิ่นที่หอมมาก

ลักษณะทั่วไปของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 เป็นข้าวเจ้าหอมไม่ไวต่อช่วงแสง ต้นสูงประมาณ 104-133 เซนติเมตร ปลูกได้ทั้งฤดูนาปีและนาปลัง อายุของการเก็บเกี่ยวนาดำ 113-126 วัน นาหว่านน้ำตม 104-114 วัน ทรงกอตั้ง ใบสีเขียวมีขน ใบแก่ช้า กาบใบและปล้องสีเขียว ใบธงยาว ตั้ง ตรงปานกลาง คอรวงสั้น รวงอยู่ใต้ใบธง เปลือกเมล็ดสีฟาง มีขน มีหาง กลีบรองดอกสีฟาง ผลผลิต 650-774 กิโลกรัมต่อไร่ ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 3-4 สัปดาห์ ข้อดีคือ ผลผลิตสูง คุณภาพคล้ายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ต้านเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล เพลี้ยกระโดดหลังขาว ต้านทานโรคไหม้และโรคขอบใบแห้ง ข้อจำกัดคือ ค่อนข้างไม่ต้านทานเพลี้ยจักจั่นสีเขียว โรคใบหงิก และโรคใบสีส้ม ไม่ควรใช้ปุ๋ยในอัตราสูงมากจนเกินไป โดยเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจน ถ้าใส่มากเกินไปอาจจะทำให้ฟางอ่อน ต้นข้าวล้มและผลิตลดลงได้ (อภิชาติ, 2557)

## 2.5 การปรับเสถียรหรือการทำก้อนแข็ง (Stabilization/Solidification)

เป็นวิธีการที่จะป้องกันหรือหรือทำให้โลหะหนักและสารปนเปื้อนในดินปล่อยออกมาช้าลงโดยใช้การเติมสารเคมีหรือขั้นตอนต่างๆ ที่มีการทำให้เกิดการจับกันทางเคมีและทำให้สารปนเปื้อนต่างๆ นั้นไม่สามารถที่จะเคลื่อนย้ายหรือเคลื่อนที่หรือแพร่กระจายออกไปไหนได้

Stabilization เป็นการตรึงโลหะหนักหรือสารปนเปื้อนโดยกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนรูปของโลหะหนักให้มีการละลายที่น้อยลง เคลื่อนที่ได้ช้าลง หรือเป็นพิษได้น้อยลง

Solidification เป็นการตรึงโลหะหนักหรือสารปนเปื้อนโดยกระบวนการทางกายภาพทำให้โลหะหนักหรือสารปนเปื้อนจับตัวกับวัสดุที่เมื่อได้รับการบำบัดฟื้นฟูแล้วจะอยู่ในรูปของของแข็ง

การปรับเสถียรสามารถทำได้ทั้งในพื้นที่ (In-situ) และนอกพื้นที่ (Ex-situ) ซึ่งวิธีแบบ In-situ นี้จะเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ดี และไม่ต้องการการปรับเปลี่ยนพื้นที่มากนัก ลดโอกาสในการสัมผัสกับสารเคมีหรือสารมลพิษได้อีกด้วย (Michael et al., 2008) ซึ่งเป็นกระบวนการทั้งการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนรูปทางเคมีของสารปนเปื้อนเพื่อให้เกิดการจับและยึดขึ้นมาหรือการจับตัวกันให้อยู่ในรูปของแข็งของสารปนเปื้อนที่อยู่ในดินซึ่งเกิดจากกระบวนการทางกายภาพ โดยวิธีนี้ไม่ได้เป็นวิธีที่ใช้แยกหรือกำจัดสารมลพิษออกจากดินเหมือนกับวิธี Soil washing หรือทำให้เกิดการลดลงของสารปนเปื้อนเหมือนกับวิธี Bioremediation แต่เป็นวิธีที่หยุดการแพร่กระจายไปของสารปนเปื้อนหรือสารมลพิษที่อยู่ในดิน และวิธีนี้จะใช้ในขั้นของการบำบัดขั้นต้นเพื่อลดความเข้มข้นของสารมลพิษที่สามารถละลายได้ในชั้นดินเพื่อให้มีระดับที่อยู่ภายใต้ระดับบังคับของกฎหมาย โดยสามารถที่จะนำเอาดินที่ได้ผ่านการบำบัดนี้ไปฝังกลบในหลุมฝังกลบต่อไปได้ มีงานวิจัยที่ศึกษาการลดความเป็นพิษของโลหะหนักในดินปนเปื้อนด้วยวัสดุปรับปรุงดิน เช่น วัสดุฟอสเฟต (Nzihou and Sharrock, 2010) ซีโอไลท์ (Friesl *et al.*, 2003) และหินปูน (Gray *et al.*, 2006) ซึ่งกระบวนการ Stabilization techniques ด้วยหินปูนเป็นแนวทางเลือกที่สำคัญทางหนึ่ง โดยองค์ประกอบของหินปูนเป็นแคลเซียมและคาร์บอเนต เมื่อละลายในน้ำสามารถเพิ่มความเป็นกรดด่างของน้ำได้ และทำให้เกิดการตกตะกอนทางเคมีกับโลหะหนักเกิดเป็นตะกอนโลหะคาร์บอเนต (กฤษดา และธรรมเรศ, 2559) และเมื่อความเป็นกรดด่างสูงขึ้นจะทำให้โลหะหนักแลกเปลี่ยนประจุของไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นรูปที่พืชหรือสิ่งมีชีวิตไม่สามารถดูดมาใช้ได้ (Chuasavathi *et al.*, 2011) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ping *et al.* (2008) ได้ศึกษาผลของการใช้สารปรับปรุงดิน 7 ชนิด ต่อการเจริญเติบโตของข้าวและการดึงดูดแคดเมียมและทองแดง โดยสารปรับปรุงดิน 7 ชนิด ผลการทดลองพบว่าหินปูนสามารถลดปริมาณแคดเมียมและทองแดงในดินที่ปนเปื้อนดีที่สุด ซึ่งทำให้ผลผลิตของเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น 12.5-16.5 หน่วย (g/pot) และสามารถลดปริมาณแคดเมียมและทองแดงในเมล็ดข้าวได้ 23-50.4 % นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้วัสดุปรับปรุงดินรวม ผลการทดลองพบว่าสามารถลดปริมาณตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในข้าว และรูปฟอร์มของโลหะหนักที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ในดินลดลง (Hang *et al.*, 2014)

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yuebing *et al.* (2012) ได้ทำการศึกษาการฟื้นฟูเสถียรภาพของดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่น้ำทิ้งของชลประทานโดยใช้ซีพิโอไลท์ โดยศึกษาการตรึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้ซีพิโอไลท์ที่มีผลต่อค่าความเป็นกรดด่างของดิน การทำงานของเอนไซม์และปริมาณจุลินทรีย์ ความเข้มข้นของแคดเมียมตามวิธี TCLP การเจริญเติบโตของผักโขม และการดูดซึมและสะสมของแคดเมียม โดยการเติมซีพิโอไลท์ที่ความเข้มข้น 0, 5, 10, 15 และ 25 g/kg ลงในดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม ผลจากการศึกษาพบว่าการเติมซีพิโอไลท์ทำให้ค่าความเป็นกรดด่างของดินสูงขึ้น 0.1-14.1% ความเข้มข้นของแคดเมียมด้วยวิธี TCLP ลดลง 0.8-10.8% และปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในลำต้นและรากของผักโขมลดลง 38.4-59.1% และ 12.6-43.6% ตามลำดับ และลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราซีพิโอไลท์ การเปลี่ยนแปลงของกิจกรรมเอนไซม์ในดินและปริมาณจุลินทรีย์แสดงให้เห็นว่ามีการฟื้นตัวหลังจากการใส่ซีพิโอไลท์ และผักโขมมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวควบคุม ผลทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าการใช้ซีพิโอไลท์สามารถตรึงแคดเมียมและเป็นวิธีลดการปนเปื้อนของแคดเมียมเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร

Yuebing *et al.* (2013) ได้ทำการศึกษาผลของซีพิโอไลท์ในการตรึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยทำการศึกษาผลของซีพิโอไลท์ในการฟื้นฟูดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม โดยใช้ชุดของตัวแปร คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเป็นกรดด่างของดิน ปริมาณแคดเมียมในผักโขม และการทำงานของเอนไซม์และจุลินทรีย์ต่างๆ ในดิน โดยทำการสังเคราะห์ดินปนเปื้อนแคดเมียมที่ความเข้มข้น 1.25, 2.5 และ 5.0 mg/kg และเติมซีพิโอไลต์ที่อัตราส่วน 0%, 0.5%, 1.0%, 3.0% และ 5.0% (w/w) ผลจากการศึกษาพบว่าค่าความเป็นกรดด่างของดินสูงขึ้นหลังจากเติมซีพิโอไลท์ และปริมาณแคดเมียมที่เป็นประโยชน์ในรูปที่พืชดูดซึมได้ลดน้อยลง อีกทั้งการเติมซีพิโอไลท์ช่วยยับยั้งการดูดซึมแคดเมียมของผักโขมจาก 28.0% เป็น 67.3%, จาก 29.4% เป็น 67.8% และจาก 17.2% เป็น 72.1% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับดินที่ไม่มีการเติมซีพิโอไลท์ ผลทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของซีพิโอไลท์ในการลดการปริมาณแคดเมียมที่จะเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร

Hang *et al.* (2014) ได้ทำการศึกษาผลของสารปรับปรุงรวมต่อการสะสมของโลหะหนักในข้าวที่ปลูกในนาที่มีการปนเปื้อน โดยศึกษาผลของสารปรับปรุงรวมทั้งสองชนิดต่อโลหะหนักในดินและการดูดซึมและสะสมโลหะหนักในต้นข้าว โดยได้ใช้สารปรับปรุงรวมสองชนิด (LS, หินปูน+ซีพิโอไลท์ : HZ, ไฮดรอกซีอะพาไทต์+ซีโอไลท์) ที่อัตราส่วน 0.2%, 0.4% และ 0.8% (w/w) เติมลงในดินนาที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักต่างๆ (Pb, Cd, Cu และ Zn) จากการศึกษาพบว่าการใช้ LS และ HZ ทำให้ค่าความเป็นกรดด่างของดินและปริมาณความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเพิ่มขึ้น LS และ HZ สามารถยับยั้งการดูดซึมและสะสมของตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และ สังกะสี ในต้นข้าวได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับดินควบคุม เมื่อเติม LS เพิ่มขึ้นจาก 0.2% ถึง 0.8% ความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และ สังกะสี ในข้าวกล้องลดลง 10.6-31.8%, 16.7-25.5%, 11.5-22.1% และ 11.7-16.3% ตามลำดับ และเมื่อเติม HZ เพิ่มขึ้นจาก 0.2% ถึง 0.8% ลดลง 5.1-40.8%, 16.7-20.0%, 8.1-16.2% และ 13.3-21.7% ตามลำดับ ผลทั้งหมดแสดงให้เห็นว่า LS และ HZ มีผลต่อการลดลงของโลหะหนัก และการสะสมโลหะในต้นข้าวที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อน

Liang *et al.* (2014) ได้ทำการศึกษาการตรึงโลหะหนักที่แหล่งกำเนิดโดยทำการปลูกข้าวในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม เพื่อตรวจสอบการฟื้นฟูที่ดีที่สุดที่จะช่วยลดการสะสมของแคดเมียมในข้าวกล้อง โดยใช้ sepiolite และ palygorskite ผลของการฟื้นฟูโดยใส่สารปรับปรุงในดินและข้าววิเคราะห์โดย X-ray diffraction และ X-ray photoelectron spectroscopy พบว่าค่าพีเอชของดินดินมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณต่างกัน และสกัดความเข้มข้นของแคดเมียมด้วย HCl, TCLP, $CaCl_2$, และ $NH_4OAc$ พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมในข้าวกล้องลดลง ทั้ง sepiolite และpolygorskite ยังช่วยลดความเข้มข้นของแคดเมียมโดยลดรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ ช่วยเพิ่มรูปฟอร์มคาร์บอเนตและรูปฟอร์มที่เหลือตกค้างในดินนา อาจทำให้เกิดการตกตะกอนแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตหรือไฮดรอกไซด์ และเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิวซึ่งเป็นกลไกหลักในการตรึงโดยใช้ sepiolite และ polygorskite ความเข้มข้นของแคดเมียมลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม sepiolite สามารถลดความเข้มข้นแคดเมียมให้ต่ำกว่า 0.18 mg/kg ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานอาหาร Codex และมาตรฐานอาหารของจีน

Xuefeng *et al.* (2014) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการปรับปรุงพื้นที่การปนเปื้อนแคดเมียมด้วย sepiolite และ palygorskite โดยศึกษาผลของสารปรับปรุงทั้งสองชนิดต่อปริมาณแคดเมียมในดินโดยทำการปลูกข้าว 2 สายพันธุ์ คือ Zhonglianyou950 (ZLY-950) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fengyou9 (FY-9) เพื่อดูการสะสมของปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว จากการทดลองพบว่าทั้ง sepiolite และ palygorskite ทำให้ค่าความเป็นกรดด่างของดินและปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมลดลง ข้าวที่มีการปรับปรุงด้วย sepiolite พบว่าข้าวสายพันธุ์ FY-9 มีปริมาณความเข้มข้นแคดเมียมอยู่ในช่วง 0.181-0.345 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การกระจายตัวของแคดเมียมในดินจากการสกัดด้วยวิธีการสกัดแบบต่อเนื่องพบว่าทั้ง sepiolite และ palygorskite มีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วน exchangeable fraction ลดลง แต่มีการเพิ่มขึ้นของ Carbonate-bond และ residual fraction ผลแสดงให้เห็นว่าการใช้ sepiolite สามารถลดปริมาณแคดเมียมได้ดีกว่าการใช้ palygorskite

Jianrui *et al.* (2015) ได้ทำการศึกษาการตรึงแคดเมียมในดินนาโดยใช้ความชื้นและการปรับปรุงดิน โดยศึกษาผลของการจัดการความชื้นและการปรับปรุงดินโดยการตรึงแคดเมียมในดินนาโดยการใช้ซีพิโอไลท์ร่วมกับปุ๋ยฟอสเฟตภายใต้การปรับปรุงแบบน้ำท่วมต่อเนื่อง การปรับปรุงน้ำแบบชลประทานธรรมดา และการปรับปรุงน้ำแบบการชลประทานแบบเปียก พบว่าสามารถลดปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ 18.2%, 13.7% และ 12.5% และแคดเมียมในข้าวกล้อง 52.3%, 46.0% และ 46.8% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับชุดควบคุม ปริมาณ $Fe^{2+}$ ในเปลือกหุ้มรากภายใต้การปรับปรุงแบบน้ำท่วมต่อเนื่องมีค่า 2.3 และ 3.6 เท่าตามลำดับ ของการปรับปรุงน้ำแบบชลประทานธรรมดาและการปรับปรุงน้ำแบบการชลประทานแบบเปียก แต่ปริมาณแคดเมียมในเปลือกหุ้มรากในการปรับปรุงแบบน้ำท่วมต่อเนื่องมีเพียง 82.6% และ 73.8% ของการปรับปรุงน้ำแบบชลประทานธรรมดาและการปรับปรุงน้ำแบบการชลประทานแบบเปียก การปรับปรุงสามารถเพิ่ม $Fe^{2+}$ ในเปลือกหุ้มรากได้ 40.1%, 70.2% และ 78.0% ตามลำดับ แต่สามารถลดปริมาณแคดเมียมในเปลือกหุ้มรากได้ 35.3%, 42.4% และ 38.6% ตามลำดับ ภายใต้การปรับปรุงแบบน้ำท่วมต่อเนื่อง การปรับปรุงน้ำแบบชลประทานธรรมดา และการปรับปรุงน้ำแบบการชลประทานแบบเปียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

# วิธีดำเนินการวิจัย

## 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) ยี่ห้อ PG INSTRUMENTS รุ่น T60 ประเทศญี่ปุ่น
2. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชั่น สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) ยี่ห้อ Perkin Elmer Precisely รุ่น AAnalyst 200 ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 827 ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
4. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter) ยี่ห้อ Orin รุ่น model 125 ประเทศสหรัฐอเมริกา
5. เครื่องกรองแบบลดความดันและกรวยบุชเนอร์
6. ไฮโดรมิเตอร์มาตรฐาน ASTM No.1.152 อ่านสเกลในหน่วยกรัมต่อลิตร
7. เครื่องกลั่น (Kfeltee system) ยี่ห้อ Fistreem Cyclon
8. เครื่องชั่งไฟฟ้าแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง (Digital Balance) ยี่ห้อ Denver Instrument Company รุ่น TL-254 ประเทศสหรัฐอเมริกา
9. เครื่องเขย่า (Orbital Shaker) ยี่ห้อ GALLENKAMP ประเทศสหรัฐอเมริกา
10. ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ memmert รุ่น BE-200 ประเทศเยอรมัน
11. เครื่องปั่นเหวี่ยงพร้อมหลอด ยี่ห้อ Sanyo รุ่น CENTAUR 2 ประเทศสหรัฐอเมริกา
12. เตานำความร้อน (hot plate)
13. ตะแกรงร่อนขนาด 20 mesh
14. กระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร
15. ครกบดดิน
16. กระถางพลาสติกขนาด 15X30 เซนติเมตร
17. ตะแกรงที่ใส่หลอดทดลอง
18. เครื่องแก้วต่างๆ

### 3.1.2 สารเคมี

1. เอธิลแอลกอฮอล์ ($C_2H_5OH$) 95% AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี
2. แอมโมเนียมฟลูออไรด์ ($NH_4F$) AR Grade (บริษัท MERCK) ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ($NH_4OH$) AR Grade (บริษัท MERCK) ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. แอมโมเนียมออกซาเลท ($(NH_4)_2C_2O_4.H_2O$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี
5. แอมโมเนียมคลอไรด์ ($NH_4Cl$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. แอมโมเนียมโมลิบเดต ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}.H_2O$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

7. แอนติโมนีโพแทสเซียมทาร์เทต ($KSbO.C_4H_4O_6$) AR Grade (บริษัท MERCK) ประเทศสหรัฐอเมริกา

8. แอสคอบิกแอซิด ($C_6H_8O_6$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

9. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

10. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

11. โบรโมครีซอลกรีน (Bromocresol Green) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

12. เมทิลเรด (Metyl Red) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

13. โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

14. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

15. แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

16. สารละลายกรดเปอร์คลอริคเข้มข้น ($HClO_4$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

17. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Conc. HCl) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

18. สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. $H_2SO_4$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

19. ซิลเวอร์ไนเตรท ($AgNO_3$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

20. กรดบอริก ($H_3BO_3$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

21. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น ($H_2O_2$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

22. คอปเปอร์ (II) ไนเตรท ($Cu(NO_3)_2$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

23. ซิงค์ไนเตรท ($Zn(NO_3)_2$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

24. เลด (II) ไนเตรท ($Pb(NO_3)_2$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

25. สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น ($HNO_3$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

26. แคดเมียมไนเตรท ($Cd(NO_3)_2$) AR Grade (บริษัท Carlo Erba) ประเทศอิตาลี

## 3.2 ตัวอย่างดิน พืช และสารปรับปรุงดิน

### 3.2.1 แหล่งที่มาของดิน

3.2.1.1 ดินที่ใช้เพาะกล้าข้าว

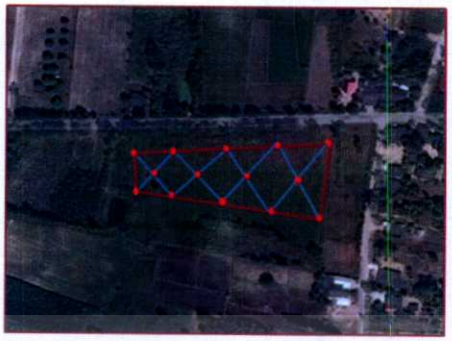
ดินตราละโว้ ของบริษัทเพชรมณีการเกษตรเป็นผู้จัดจำหน่าย มีลักษณะเป็นดินดำ ใช้ปลูกต้นไม้ได้ทุกชนิด ซึ่งหาซื้อได้ทั่วไปตามท้องตลาด

3.2.1.2 ดินที่ใช้ผสมสารปรับปรุง

ดินที่ใช้ในการทดลองเก็บตัวอย่างดินมาจากจังหวัดระยอง โดยทำการสุ่มตัวอย่างดินที่ความลึก 0-30 เซนติเมตร จากการเก็บหลายๆ จุดมาคลุกเคล้าผสมกัน เป็นการเก็บแบบผสมรวม โดยดินทั้งหมดใช้เป็นตัวแทนของดินนาทั้งแปลง อยู่ในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดระยอง พิกัดละติจูดที่ 12°37'

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

45.02” ลองติจูดที่ 101°24’ 16.71” เก็บตัวอย่างในวันที่ 1 สิงหาคม 2558



**รูปที่ 3.1** แปลงนาจังหวัดระยอง

**3.2.2 พืชทดลอง**

ข้าวที่ใช้คือ พันธุ์ปทุมธานี 1 เป็นข้าวเจ้าไม่ไวแสง ผลผลิต 650-774 กิโลกรัมต่อไร่ คัดเลือกเมล็ดพันธุ์ที่มีความสมบูรณ์ (ไม่มีรอยกัดแหว่ง ไม่ลอยน้ำ) แหล่งที่มาจากแปลงเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร

การเตรียมกล้าข้าว เริ่มจากแช่เมล็ดข้าวในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง คัดเอาแกลบทิ้ง จากนั้นนำเมล็ดข้าวที่คัดขึ้นจากน้ำ บ่มให้รากงอกโดยใช้ผ้าชุ่มน้ำคลุมเมล็ดข้าวไว้เป็นเวลา 36 ชั่วโมง นำเมล็ดข้าวไปเพาะในถาดเพาะ ที่ใส่ดินดำไว้ เมื่อกล้าข้าวมีอายุครบ 15 วัน และมีความสูงประมาณ 15-20 เซนติเมตร จึงย้ายลงปลูกในกระถางพลาสติก ที่ใส่ดินผสมสารปรับปรุงดินไว้ตามอัตราส่วน

**3.2.3 สารปรับปรุงดิน**

สารปรับปรุงดินที่ใช้ได้แก่

3.2.3.1 หินปูน (limestone) AR Grade (บริษัท Loba Chemie) ประเทศอินเดีย มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และคงสภาพได้ดี ดังรูปที่ 3.2

3.2.3.2 ซีพิโอไลท์ (Sepiolite) AR Grade (บริษัท Sigma Aldrich) ประเทศสเปน มีลักษณะเป็นผงสีขาวออกน้ำตาล ไม่มีกลิ่น และคงสภาพได้ดี ดังรูปที่ 3.3

**รูปที่ 3.2** หินปูนที่ใช้ในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 3.3** ซีพิโอไลท์ที่ใช้ในงานวิจัย

## 3.3 การดำเนินการทดลอง

### 3.3.1 การเตรียมตัวอย่างดินสำหรับการวิเคราะห์

นำตัวอย่างดินมาผึ่งให้แห้ง บด และร่อนด้วยตะแกรงขนาด 20 mesh เก็บแยกในถุงพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป (ตารางที่ 3.1)

### 3.3.2 การเตรียมตัวอย่างสารปรับปรุงสำหรับการวิเคราะห์

นำตัวอย่างสารปรับปรุงดินทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ หินปูน และซีพิโอไลท์ มาบดร่อนด้วยตะแกรงขนาด 20 mesh เก็บแยกในถุงพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ ปริมาณความชื้น (moisture) และปริมาณโลหะหนักทั้งหมด (total heavy metals) (ตารางที่ 3.1)

**ตารางที่ 3.1** เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของดิน และสารปรับปรุงดินทั้งก่อนการปลูกข้าว

| พารามิเตอร์ | วิธีวิเคราะห์*/เครื่องมือ |
|---|---|
| ค่าความเป็นกรดด่าง | pH meter (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551) |
| ค่าการนำไฟฟ้า | Conductivity meter (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551) |
| ขนาดของอนุภาค | Particle size analysis |
| ความหนาแน่นรวมของดิน | Core method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551) |
| ความชื้น | Gravimetric method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551) |
| อินทรียวัตถุ | Walkley and Black method (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551) |
| รูปแบบของโลหะหนัก | Sequential extraction (Tessler *et al.*, 1979) |
| ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด | X-ray Fluorescence (XRF) (ISO 9516-1) |
| | Acid digestion Method 3050B (US.EPA, 1996) |
| ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก | Ammonium saturation method (EPA 9080 method) |

*หมายเหตุ : วิธีการวิเคราะห์อยู่ในภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินและสารปรับปรุงดิน**

การนำสารปรับปรุงดิน และดินนามาปลูกข้าว ต้องวิเคราะห์คุณสมบัติของสารปรับปรุง และดิน เพื่อศึกษาผลกระทบที่อาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าว (ตารางที่ 3.1)

**3.3.4 การสังเคราะห์ตัวอย่างดิน**

นำตัวอย่างดินที่เก็บมาจากจังหวัดระยอง มาทำการสังเคราะห์โลหะหนักลงในดิน โดยผึ่งดินให้แห้ง บด จากนั้นทำการเติมสารละลายโลหะหนักให้ได้ความเข้มข้นดังนี้ ตะกั่ว 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง สังกะสี 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง แคดเมียม 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง และทองแดง 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ลงในดิน ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งความเข้มข้นดังกล่าวเป็นความเข้มข้นที่ตรวจพบว่าปนเปื้อนในดินประเทศไทย (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551) บ่มดินเป็นเวลา 1 เดือน เพื่อนำไปทดลองต่อไป

**3.3.5 การผสมดินสังเคราะห์กับสารปรับปรุงดิน**

นำดินที่สังเคราะห์ได้จากข้อ 3.3.4 มาทำการผสมสารปรับปรุงดิน 2 ชนิด คือ หินปูน และซีพิโอไลท์ โดยใช้ที่อัตราส่วนของสารปรับปรุงดังนี้

- ดินระยอง (ไม่สังเคราะห์ดินและไม่ใส่สารปรับปรุง)
- ดินควบคุม (ไม่ใส่สารปรับปรุง)
- ดินผสมหินปูน:ซีพิโอไลท์ (1:0)
- ดินผสมหินปูน:ซีพิโอไลท์ (0:1)
- ดินผสมหินปูน:ซีพิโอไลท์ (1:1)
- ดินผสมหินปูน:ซีพิโอไลท์ (2:1)

ในแต่ละอัตราส่วนจะนำมาผสมกับดินที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วน 0.2%, 0.4% และ 0.8% (w/w) ของน้ำหนักดินแต่ละกระถาง ทดลอง 3 ซ้ำ และดินที่ไม่มีการสังเคราะห์และไม่ใส่สารปรับปรุงจะใช้เป็นตัวควบคุม

**3.3.6 การวางแผนการทดลอง**

วางแผนการทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ (Completely Randomized Design (CRD)) ทำการสุ่มโดยวิธีการจับฉลาก แบ่งหน่วยการทดลองออกเป็น 42 หน่วยการทดลอง ดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 3.4** แผนการทดลองจากการจับฉลาก

รหัสตัวอย่าง

ดินไม่สังเคราะห์ : RA
ดินสังเคราะห์ไม่ผสมสารปรับปรุง : CT
ดินผสมหินปูน:ซีพีโอไลท์ (1:0) : B
ดินผสมหินปูน:ซีพีโอไลท์ (0:1) : C
ดินผสมหินปูน:ซีพีโอไลท์ (1:1) : D
ดินผสมหินปูน:ซีพีโอไลท์ (2:1) : E

อัตราส่วน 0.2% : X
อัตราส่วน 0.4% : Y
อัตราส่วน 0.8% : Z

### 3.3.7 ขั้นตอนการปลูกข้าว และบันทึกผล

1) ผสมสารปรับปรุงดินกันดิน ตามอัตราส่วนลงในกระถางพลาสติกขนาด 15X30 เซนติเมตร ทิ้งไว้ 10 วัน เพื่อให้ดินเกิดความเสถียร จากนั้นเก็บตัวอย่างดินนำไปวิเคราะห์ตามตารางที่ 3.1

2) หลังจากนั้นนำต้นกล้าข้าว แยกลงปลูกในถังพลาสติกที่เตรียมดินผสมสารปรับปรุงดิน ถังละ 3 ต้น ขังน้ำไว้สูงประมาณ 5-10 เซนติเมตร ตลอดระยะเวลาการปลูก กำจัดวัชพืชโดยใช้มือถอน และคอยสังเกตศัตรูพืช หากมีต้องรีบกำจัด และควบคุมการเติมน้ำให้ปริมาณเท่ากันทุกกระถาง

3) บันทึกการเจริญเติบโตของต้นข้าว โดยการวัดความสูงของต้นข้าวทุกสัปดาห์

4) กางมุ้งให้ข้าวในช่วงที่ข้าวเริ่มออกดอก เพื่อป้องกันป้องกันศัตรูพืช

5) เก็บเกี่ยวข้าวเมื่อได้อายุประมาณ 120 วัน นับตั้งแต่วันที่เพาะกล้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) หลังจากการเก็บเกี่ยว นำพืชแต่ละกระถางชั่งน้ำหนักของต้นพืช ล้างดินออกจากพืชให้หมด นำพืชไปอบที่อุณหภูมิ 65°C จนแห้ง ชั่งน้ำหนักแห้งของต้นพืช

7) เก็บตัวอย่างดินหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อนำไปวิเคราะห์ตามตารางที่ 3.1 ต่อไป แบ่งพืชออกเป็น 3 ส่วน เมล็ด ลำต้นรวมกับใบ และราก

8) นำเมล็ดข้าวที่เก็บเกี่ยวได้ทั้งหมดในแต่ละกระถางไปอบที่อุณหภูมิ 65°C จนแห้ง เพื่อชั่งหาน้ำหนักแห้งเชิงปริมาณ และชั่งน้ำหนักข้าวแห้ง 1,000 เมล็ด เพื่อหาน้ำหนักแห้งเชิงคุณภาพ และนำไปวิเคราะห์ตามตารางที่ 3.1

### 3.3.8 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในดิน

นำตัวอย่างดินทั้งก่อนปลูกและหลังปลูกข้าวชั่งตัวอย่างละ 1 กรัม นำมาหาปริมาณโลหะหนักทั้งหมดโดยสกัดด้วยวิธี Acid digestion (US.EPA, 1996), และศึกษาโลหะในรูปต่างๆ โดยสกัดด้วยวิธี Sequential extraction (Tessler *et al.*, 1979) กรองด้วย Syringe Filter 0.45 ไมโครเมตร และวิเคราะห์ปริมาณโลหะด้วย Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

### 3.3.9 การเตรียมตัวอย่างพืชสำหรับการวิเคราะห์

นำทุกส่วนของพืช มาล้างดินออกจนหมด อบที่อุณหภูมิ 65-70°C จนแห้ง บดให้ละเอียด และนำไปร่อนขนาด 20 mesh เก็บแยกในถุงพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ Total Heavy metals ด้วยการย่อยด้วยกรด ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 มิลลิลิตร กรองด้วย Syringe Filter 0.45 ไมโครเมตร และวิเคราะห์ปริมาณโลหะด้วย Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

## 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

### 3.4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลแบบ one-way (ANOVA) โดยใช้โปรแกรม GraphPad Prism version 7.04 (GraphPad Software, USA) ทดสอบความแตกต่าง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิเคราะห์ข้อมูลดินเปรียบเทียบภายในชุดการทดลอง และระหว่างชุดการทดลองของดินทั้งก่อนและหลังการปลูกข้าว

### 3.4.2 การวิเคราะห์การสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation factor, BAF)

การศึกษาอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักในพืชและดิน สามารถบ่งชี้ถึงความสามารถของพืชในการดูดซับโลหะหนักจากดิน จากการนำข้อมูลความเข้มข้นทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ในพืช และดิน นำมาคำนวณค่าการสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation factor, BAF) โดยใช้สูตร (Dilna et al., 2014)

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

$C_{metal\ in\ dried\ biomass}$ = ความเข้มข้นของโลหะหนักในพืช (mg/kg)

$C_{metal\ in\ the\ soil}$ = ความเข้มข้นของโลหะหนักในดิน (mg/kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก (Translocation factor, TF)**

การศึกษาอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักในส่วนเหนือดิน (เมล็ด+ลำต้นรวมกับใบ) และราก สามารถบ่งชี้ได้ว่ามีการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากรากไปสู่เมล็ดข้าวมากน้อยเพียงใด จากการนำข้อมูลความเข้มข้นของทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ในเมล็ด ลำต้นรวมกับใบ และรากของข้าว นำมาคำนวณค่าการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก (Translocation factor, TF) จากรากสู่เมล็ด โดยใช้สูตร (Sutapa and Bhattacharyya, 2008)

$$TF = (C_{shoot\ (mg/kg)}/C_{root\ (mg/kg)})$$

$C_{shoot}$ = ความเข้มข้นของโลหะหนักในส่วนเหนือดิน (mg/kg)

$C_{root}$ = ความเข้มข้นของโลหะหนักในราก (mg/kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4
# ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

## 4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

### 4.1.1 สมบัติทั่วไป

ดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินที่เก็บจากพื้นที่ตำบลบ้านแลง อำเภอเมือง จังหวัดระยอง ซึ่งจากตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์หาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน พบว่าดินจังหวัดระยองมีลักษณะเป็นดินเหนียวปนทราย (ภาคผนวก ข) ซึ่งจัดเป็นดินประเภทเนื้อละเอียด มีสีเทาปนน้ำตาล มีค่าความหนาแน่นรวมของดินปานกลาง มีความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านได้ของดินช้า (กรมพัฒนาที่ดิน, 2545) มีความชื้นของดินประมาณ 47.85%

**ตารางที่ 4.1** สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

| พารามิเตอร์ | | ผลการวิเคราะห์ |
|---|---|---|
| ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) | | 3.27±0.05 |
| ค่าการนำไฟฟ้า (μS/cm) | | 579.67±3.06 |
| ลักษณะเนื้อดิน | | ดินเหนียวปนทราย |
| ความหนาแน่นของดิน ($g/cm^3$) | | 1.62±0.03 |
| ความชื้น (%) | | 47.85±4.56 |
| อินทรียวัตถุ (%) | | 6.25±0.18 |
| ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (meq/100 g) | | 107.10±0.62 |
| ปริมาณธาตุ | Al | 10.6% |
| | Mg | 0.100% |
| | O | 48.6% |
| | Si | 32.5% |
| | S | 1.84% |
| | Ti | 0.197% |
| | Mn | 0.903% |
| | Cu | 0.101% |
| | Sm | 4.35% |
| | V | 0.809% |
| ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด (mg/kg) | Cd | 3.90±0.36 |
| | Cu | 15.32±0.85 |
| | Pb | 31.02±0.97 |
| | Zn | 102.44±3.47 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเป็นกรดด่างสูงคือ 3.27 (pH<4.5) และเมื่อทำการปรับปรุงดินโดยการเติมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ ลงในดิน ทำให้ค่าความเป็นกรดด่างของดินเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.5) ซึ่งอยู่ในช่วงความเป็นกรดด่างเหมาะสมสำหรับการปลูกข้าวคือ 6.5-7.5 (กรมการข้าว, 2560) ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (OM) มีค่าเท่ากับ 6.25% (ระดับอินทรียวัตถุที่ใช้เป็นมาตรฐาน > 4.5% ถือว่าดินนั้นมีระดับอินทรียวัตถุในปริมาณสูงมาก) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2545) ซึ่งอยู่ในระดับที่สูงมาก ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) มีค่าเท่ากับ 107.10 มิลลิสมมูลต่อดิน 100 กรัม และยังพบว่ามีออกไซด์ของซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al) สูงคือ 32.5% และ 10.6% ตามลำดับ แสดงว่าค่าความอุดมสมบูรณ์ของดินค่อนข้างสูง (สมบัติทางเคมีของดิน, 2548) โดยปกติความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อดินมีเนื้อละเอียดหรือมีสัดส่วนของดินเหนียว (clay fraction) เพิ่มมากขึ้น อนุภาคดินเหนียวจะมีประจุลบอยู่ที่บริเวณผิวเป็นส่วนใหญ่มีการจับกับไอออนอย่างหลวมๆ จึงสามารถแทนที่ด้วยประจุอื่นๆ ได้โดยง่าย (ปฐพีเบื้องต้น, 2548)

จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด (ตารางที่ 4.1) พบว่ามีปริมาณแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.90, 15.32, 31.02 และ 102.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยที่สำรวจและตรวจพบของโลหะหนักในดินประเทศไทย (กรมวิชาการเกษตร, 2548) ที่กำหนดไว้ คือปริมาณแคดเมียม 0.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณทองแดง 45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณตะกั่ว 55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณสังกะสี 70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่ไม่เกินค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

### 4.1.2 สมบัติของสารปรับปรุงดิน

จากตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของสารปรับปรุงดิน พบว่าหินปูนและซีพิโอไลท์ มีค่าความเป็นกรดด่าง 9.57 และ 8.80 ตามลำดับ ซึ่งค่าความเป็นกรดด่างเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน (Worachart, 2012) ซึ่งสารปรับปรุงทั้งสองชนิดเป็นสารที่มีความเป็นเบส สามารถเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างในดินให้สูงขึ้น และลดความสามารถในการละลายและการเคลื่อนที่ของโลหะหนักที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ (Li *et al.*, 2006) ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักของหินปูนและซีพิโอไลท์มีปริมาณเล็กน้อย ยกเว้นปริมาณแคดเมียมและตะกั่วในหินปูนที่มีปริมาณค่อนข้างสูง อาจจะทำให้ปริมาณโลหะหนักในดินเพิ่มสูงขึ้นได้

**ตารางที่ 4.2** ค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณโลหะหนักของสารปรับปรุงดิน

| พารามิเตอร์ | | ชนิดสารปรับปรุง | |
|---|---|---|---|
| | | หินปูน | ซีพิโอไลท์ |
| ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) | | 9.57±0.01 | 8.80±0.02 |
| ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด (mg/kg) | Cd | 6.10±1.64 | 1.40±0.30 |
| | Cu | 1.30±0.26 | 3.50±0.66 |
| | Pb | 26.16±4.20 | 8.86±2.78 |
| | Zn | 3.40±1.40 | 9.16±0.85 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุของสารปรับปรุงดินโดยใช้เทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) พบว่าหินปูนมีปริมาณแคลเซียม (Ca) เป็นองค์ประกอบสูงถึง 60.2% รองลงมาคือออกซิเจน (O) 28.2% ส่วนซีพิโอไลท์มีปริมาณออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบสูงถึง 45.5% รองลงมาคือซิลิกอน (Si) 27.2% และแมกนีเซียม (Mg) 19.2% และพบธาตุชนิดอื่นๆ เพียงเล็กน้อย ซึ่งองค์ประกอบของธาตุในสารปรับปรุงดินเหล่านี้มีคุณสมบัติในการดูดซับและมีความสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ (Baskaralingram *et al.*, 2006) ส่งผลต่อการตรึงและดูดซับโลหะหนักที่เป็นพิษได้ดี (Bergaya *et al.*, 2006)

**ตารางที่ 4.3** ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุของสารปรับปรุงดินด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

| ตัวอย่าง | ชนิดธาตุ | ปริมาณธาตุ |
|---|---|---|
| หินปูน | Ca | 60.2% |
| | O | 28.2% |
| | Mg | 1.18% |
| | Cu | 0.173% |
| | Fe | 0.208% |
| | Mn | 0.913% |
| | S | 0.180% |
| | Nd | 6.84% |
| | V | 2.07% |
| ซีพิโอไลท์ | O | 45.5% |
| | Si | 27.2% |
| | Mg | 19.5% |
| | Ho | 0.101% |
| | Fe | 0.425% |
| | Ca | 0.277% |
| | S | 0.152% |
| | La | 4.41% |
| | Sm | 2.39% |

จากตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของสารปรับปรุงดินโดยใช้เทคนิคตามทฤษฎีของ Brunauer Emmett Teller (BET) พบว่าซีพิโอไลท์มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนมาก ซึ่งพื้นที่ผิวที่มากจะทำให้มีพื้นที่เกิดประจุมาก ทำให้สามารถยึดจับพวกโลหะหนักหรือธาตุอื่นได้ (กรมทรัพยากรธรณีวิทยา, 2560) พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับ เมื่อพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น (Puchong, 2015) อีกทั้งขนาดรูพรุนยังมีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับอีกด้วย (Wild *et al.*, 2002) ซึ่งตาม IUPAC มีการแบ่งขนาดรูพรุนของวัสดุดูดซับไว้ 3 ประเภท ซึ่งทั้งหินปูนและซีพิ-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

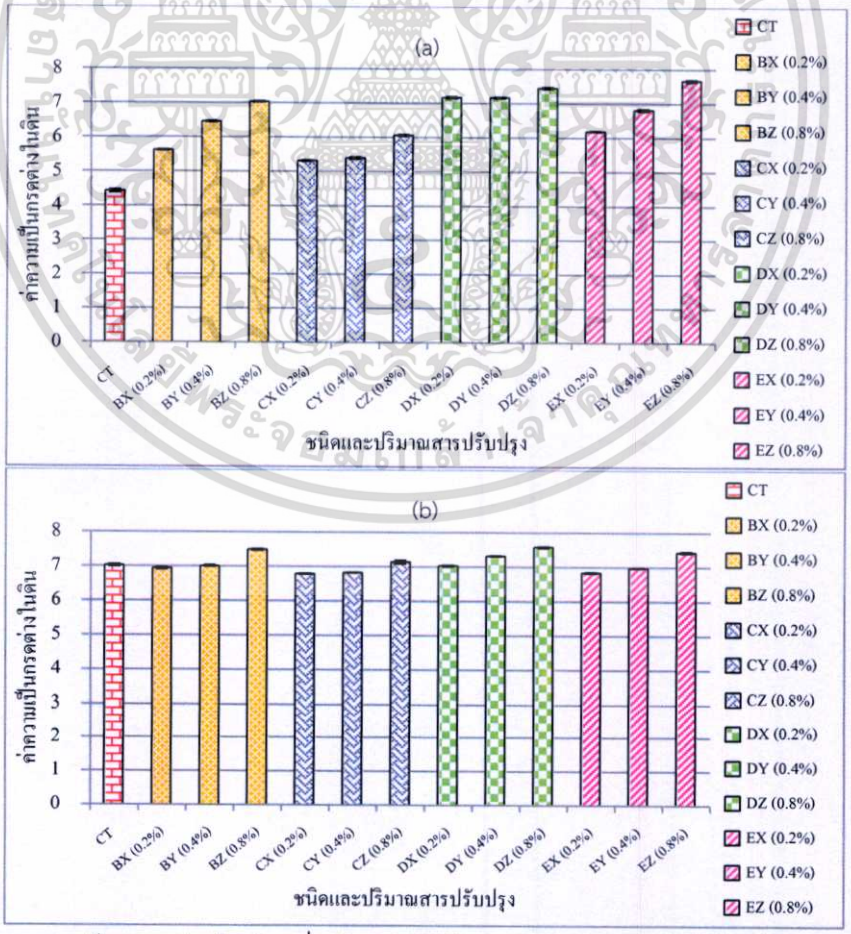
โอไลท์เป็นตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง (เส้นผ่าศูนย์กลาง 2-50 nm) คือมีขนาดรูพรุน 23.87 และ 11.38 นาโนเมตร ตามลำดับ ทำให้ซีพิโอไลท์อาจจะดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าหินปูน และเมื่อมีการผสมสารปรับปรุงทั้งสองชนิดรวมกันอาจจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับและตรึงโลหะหนักในดินได้ดี

**ตารางที่ 4.4** ขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของสารปรับปรุงดิน

| สารปรับปรุง | พื้นที่ผิว (surface area) $m^2/g$ | ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) cc/g | ขนาดรูพรุน (Pore size) nm. |
|---|---|---|---|
| หินปูน | 4.067 | 0.0242 | 23.87 |
| ซีพิโอไลท์ | 169.2 | 0.5002 | 11.83 |

### 4.1.3 ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่างในดินหลังเติมสารปรับปรุงดิน

จากรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงค่าความเป็นกรดด่างของดินเมื่อเติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน:ซีพิโอไลท์) ลงในดินระยองในอัตราส่วนต่างๆ กันคือ 1:0 (B), 0:1 (C), 1:1 (D) และ 2:1 (E) โดยเติมที่ระดับความเข้มข้น 0.2% (X), 0.4% (Y), และ 0.8% (Z) เป็นระยะเวลา 1 เดือนก่อนนำมาปลูกข้าว




**รูปที่ 4.1** ค่าความเป็นกรดด่างในดินเมื่อเติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน:ซีพิโอไลท์) ก่อนปลูกข้าว (a) และหลังปลูกข้าว (b) ในอัตราส่วนต่างๆ (Mean±S.D.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าค่าความเป็นกรดด่างของดินจะเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับดินชุดระยอง (RA) และดินชุดควบคุม (CT) ที่ไม่ได้เติมสารปรับปรุงดิน และหลังการปลูกข้าวค่าความเป็นกรดด่างของดินระยอง (RA) และดินควบคุม (CT) มีค่าเพิ่มขึ้น อาจจะเนื่องมาจากเกิดกระบวนการไฮเดรชั่นของน้ำกับไอออนของโลหะในสภาวะดินที่มีน้ำขัง ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดด่างของดินสูงขึ้นได้ หรืออาจเกี่ยวข้องกับกระบวนทางชีวเคมีที่เกิดจากจุลินทรีย์ในดิน (อนนท์, 2548) ซึ่งความเป็นกรดด่างของดินนาเมื่อมีสภาพน้ำขัง ความเป็นกรดด่างของดินจะปรับเข้าสู่ความเป็นกลาง ซึ่งมีความเป็นกรดด่างคือ 6.54-7.50 (Patrick *et al.*, 1978) และค่าความเป็นกรดด่างในดินเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการดูดซับโลหะหนัก (Basta *et al.*, 2005) และยังส่งผลต่อการนำไปใช้ของสิ่งมีชีวิต (Barancikova, 2004) โดยการเติมหินปูนในรูปของคาร์บอเนตลงในดินที่มีความเป็นกรด จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างหินปูนกับสารละลายดิน ซึ่งอิ่มตัวด้วย $CO_2$ คาร์บอเนตจะเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมไบคาร์บอเนตดังสมการที่ 4.1 เมื่อเกิดการแตกตัวจะได้แคลเซียมไอออน ($Ca^{2+}$) และไบคาร์บอเนต ($HCO_3^-$) ดังสมการที่ 4.2 (ปฐพีวิทยาเบื้องต้น, 2548) ทำให้แคลเซียมไอออนจะเข้าไปไล่ที่ไฮโดรเจนไอออน ($H^+$) ที่เกาะกับคอลลอยด์ผิวดิน โดยที่ไฮโดรเจนไอออน ($H^+$) จะเปลี่ยนไปเป็นส่วนประกอบในโมเลกุลของน้ำ คาร์บอเนตไอออนจะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระเหยออกจากดินดังสมการที่ 4.3 (ปิยะ, 2553) ทำให้ค่าความเป็นกรดด่างของดินสูงขึ้น ส่วนซีพิโอไลท์เป็นสารที่มีความเป็นเบส และเป็นวัสดุดูดซับทางสิ่งแวดล้อมที่มีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งเมื่อเกิดการแตกหักบริเวณขอบของผลึกทำให้พื้นผิวมีประจุเป็นลบ (Si-O-Si) สามารถดูดซับไฮโดรเจนไอออน ($H^+$) อิสระในสารละลายดิน ทำให้ไฮโดรเจนไอออนในดินลดลงส่งผลให้ค่าความเป็นกรดด่างเพิ่มขึ้น รวมถึงเกิดการแลกเปลี่ยนแคตไอออน ($H^+$, $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $K^+$ และ $Na^+$) และเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนบวกที่พื้นผิว แสดงให้เห็นว่าทั้งหินปูนและซีพิโอไลท์สามารถทำให้ความเป็นกรดด่างสูงขึ้น การใช้สารสองชนิดร่วมกันอาจส่งผลที่ดีในการลดความสามารถในการละลายและการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน (Garau *et al.*, 2007) เนื่องจากค่าความเป็นกรดด่างที่สูงจะเพิ่มประจุลบบนดินแขวนลอย และส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับโลหะประจุบวก (Lee *et al.*, 2009) ส่งผลให้พืชสามารถดูดโลหะหนักได้น้อยลง และค่าความเป็นกรดด่างที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับปลูกข้าวคือ 6.5-7.5 (กรมการข้าว, 2560) ทำให้ข้าวสามารถเจริญเติบโตได้

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2 \quad (4.1)$$

$$Ca(HCO_3)_2 \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2HCO_3^- \quad (4.2)$$

$$Colloid\text{--}2H^+ + CaCO_3\,(s) \longrightarrow Colloid\text{--}Ca^{2+} + H_2O + CO_2 \quad (4.3)$$

## 4.2 ผลผลิตของข้าว

การวิเคราะห์ผลผลิตทั้งหมดของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 เพื่อชั่งน้ำหนักแห้งเชิงปริมาตร และชั่งน้ำหนักข้าว 1,000 เมล็ด เพื่อหาน้ำหนักแห้งเชิงคุณภาพ เพื่อใช้ประเมินได้ว่าที่ดินอัตราส่วนและความเข้มข้นของสารปรับปรุงชนิดใด มีความเหมาะสมในการปลูกข้าวมากที่สุด และทำให้ข้าวมีผลผลิตสูง จากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อเติมสารปรับปรุงดินที่อัตราส่วนหินปูนต่อซีพิโอไลท์ 1:0 และ 0:1 ที่ความเข้มข้น 0.2% เมื่อเทียบผล T-Test พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมั่น 95% ให้ผลผลิตของข้าวมีค่าใกล้เคียงกัน และที่อัตราส่วนหินปูนต่อซีพิโอไลท์ 1:1 ที่ความเข้มข้น 0.4% และ 0.8 % มีผลผลิตน้ำหนักข้าวแห้งเชิงคุณภาพ 1,000 เมล็ดมากที่สุดคือ 10.61 และ 10.41 กรัม ตามลำดับ โดยที่อัตราส่วนหินปูนต่อซีพิโอไลท์ 2:1 ที่ความเข้มข้น 0.4% มีปริมาณน้ำหนักแห้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพที่ค่อนข้างสูง และปริมาณโลหะหนักในเมล็ดข้าวต่ำกว่าค่ามาตรฐานอาหาร (ตารางที่ 4.6) ให้ผลทั้งในด้านความปลอดภัยและคุณภาพเมล็ดที่ดีกว่า ซึ่งผลผลิตที่ได้อาจมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับชุดดินระยอง (RA) ซึ่งมีปริมาณผลผลิตข้าวต่อกระถางที่สูง แต่ก็มีปริมาณน้ำหนักแห้งเชิงคุณภาพที่ต่ำ และมีปริมาณโลหะหนักในเมล็ดที่สูงเกินค่ามาตรฐานอาหาร (หัวข้อ 4.4) และพบว่าในทุกอัตราส่วนที่เติมสารปรับปรุงดินทำให้น้ำหนักแห้งเชิงคุณภาพไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งในชุดควบคุม (CT) ที่ไม่มีการเติมสารปรับปรุงดินต้นข้าวไม่สามารถเจริญเติบโตและอยู่รอดได้ อาจเกี่ยวข้องกับปริมาณโลหะหนักและความเป็นกรดด่างที่สูงในดินที่สูง ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวเจริญเติบโตได้ดีให้ผลผลิตที่สูงขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็นปริมาณธาตุอาหารของพืช สมบัติทางกายภาพของดิน ได้แก่ เนื้อดิน การอุ้มน้ำ และการระบายน้ำของดิน เป็นต้น (กรมการข้าว, 2560) รวมถึงสภาพภูมิอากาศ สภาพแวดล้อม โรคและศัตรูพืชของข้าว

**ตารางที่ 4.5** น้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนโลหะหนักและเติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน:ซีพิโอไลท์) อัตราส่วนต่างๆ (Mean±S.D.)

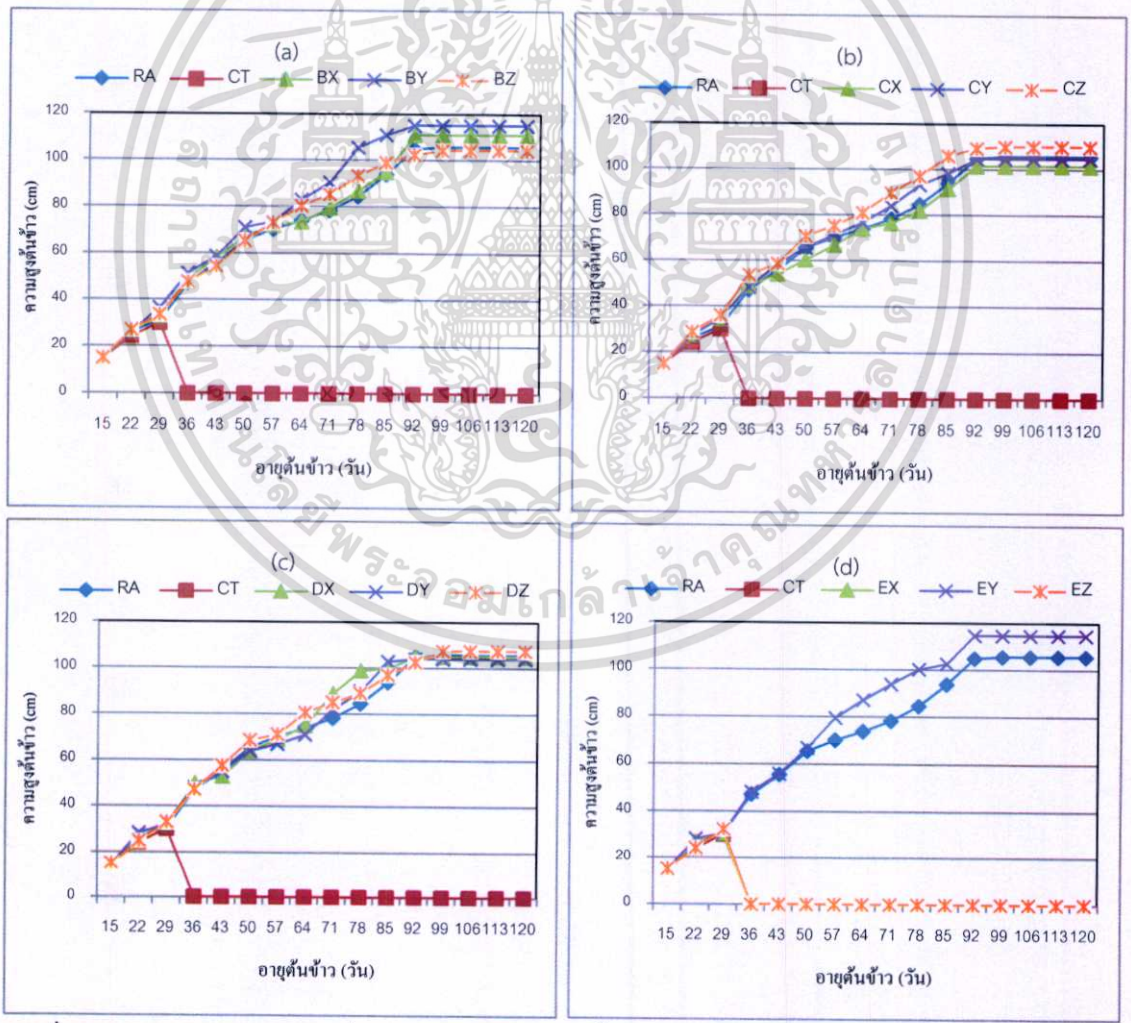
| ตัวอย่าง (หินปูน:ซีพิโอไลท์) | | น้ำหนักเมล็ด (g/pot) | น้ำหนัก 1000 เมล็ด (g) |
|---|---|---|---|
| ดินระยอง (RA) | | 21.04±3.55 | 14.38±1.46 |
| ดินควบคุม (CT) | | NG | NG |
| (1:0) (B) | 0.2% (X) | 7.93±4.36 | 9.42±0.56 |
| | 0.4% (Y) | 2.37±0.93 | 9.26±1.30 |
| | 0.8% (Z) | 3.50±1.88 | 7.67±0.69 |
| (0:1) (C) | 0.2% (X) | 2.04±1.05 | 8.17±0.90 |
| | 0.4% (Y) | 3.57±1.27 | 10.61±1.96 |
| | 0.8% (Z) | 4.39±1.84 | 10.41±0.39 |
| (1:1) (D) | 0.2% (X) | 3.84±0.00 | 9.43±0.00 |
| | 0.4% (Y) | 2.94±0.00 | 6.44±0.00 |
| | 0.8% (Z) | 5.60±1.14 | 8.94±0.93 |
| (2:1) (E) | 0.2% (X) | NG | NG |
| | 0.4% (Y) | 6.22±0.37 | 9.58±1.7 |
| | 0.8% (Z) | NG | NG |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.3 การเจริญเติบโตของข้าว

การวิเคราะห์ความสูงของต้นข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่ปลูกในดินปนเปื้อนโลหะหนักและเติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน:ซีพีโอไลท์) อัตราส่วนต่างๆ กัน สามารถนำมาประเมินการเจริญเติบโตของข้าวว่าที่อัตราส่วนใดเหมาะสมต่อการนำไปใช้ปลูกข้าวมากที่สุด ทำการวัดความสูง และเก็บข้อมูลทุกสัปดาห์ตั้งแต่เริ่มปักกล้าข้าวจนถึงก่อนการเก็บเกี่ยว จากข้อมูลข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่ปลูกในดินนาจังหวัดระยอง ใช้ระยะเวลาการปลูกทั้งหมด 120 วัน พบว่าหลังจากย้ายกล้าข้าวลงในกระถางพลาสติก ต้นข้าวจะมีความสูงเฉลี่ย 15 เซนติเมตร (ทุกชุดการทดลอง) การเจริญเติบโตของข้าวแบ่งได้เป็น 3 ระยะ โดยในระยะแรกเป็นระยะที่ข้าวมีการแตกกอ ความสูงของต้นข้าวจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการปลูก คือช่วงอายุข้าว 30-60 วัน จนถึงระยะการเจริญเติบโตทางระบบสืบพันธุ์ ข้าวสร้างรวง ตั้งท้อง และออกดอกผสมพันธุ์ (กรมการข้าว, 2560) ความสูงจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ คือช่วง 60-80 วัน ส่วนระยะสุดท้ายคือระยะที่ข้าวเจริญเติบโตทางเมล็ด ภายในเมล็ดจะเปลี่ยนเป็นแป้งแข็ง จนกระทั่งสุกแก่ ซึ่งในระยะนี้ความสูงของต้นข้าวจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากเป็นระยะการเจริญเติบโตทางด้านเมล็ดมากกว่า คือช่วง 80-120 วัน




**รูปที่ 4.2** ความสูงของต้นข้าวที่ปลูกในดินระยองปนเปื้อนโลหะหนักและเติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน: ซีพีโอไลท์) อัตราส่วน 1:0 (a), 0:1 (b), 1:1 (c) และ 2:1 (d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดความสูงต้นข้าว พบว่าข้าวที่ปลูกในดินที่เติมสารปรับปรุงดินที่อัตราส่วนหินปูน:ซีพิโอไลท์ 1:0 ที่ความเข้มข้น 0.4% มีความสูงมากที่สุดเฉลี่ย 110-120 เซนติเมตร (รูปที่ 4.2) ซึ่งความสูงของต้นข้าวไม่สอดคล้องกับผลผลิตของข้าว เนื่องจากผลผลิตของข้าวสูงที่สุดเมื่อปลูกในอัตราส่วนหินปูน:ซีพิโอไลท์ 1:0 ที่ความเข้มข้น 0.2% (7.93 กรัมต่อกระถาง) (ตารางที่ 4.5) เมื่อเปรียบเทียบความสูงของข้าวจากงานวิจัยนี้ มีความสอดคล้องกับข้าวที่ปลูกในดินทั่วไปตามข้อมูลของกรมการข้าว พบว่ามีความสูงอยู่ระดับเดียวกัน (104-133 เซนติเมตร) (สำนักเมล็ดพันธุ์ข้าว, 2560) แต่ให้ผลผลิตเมล็ดในระดับปานกลาง (ตารางที่ 4.5) ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับปัจจัยด้านความอุดมสมบูรณ์ของต้นข้าว ที่มีแต่ความสูงต้นแต่มีการแตกกอของข้าวน้อย เมื่อเทียบกับดินควบคุมที่ข้าวไม่มีการเจริญเติบโตหรืออยู่รอดได้

## 4.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสารปรับปรุงดินต่อการลดลงของโลหะหนักในข้าว

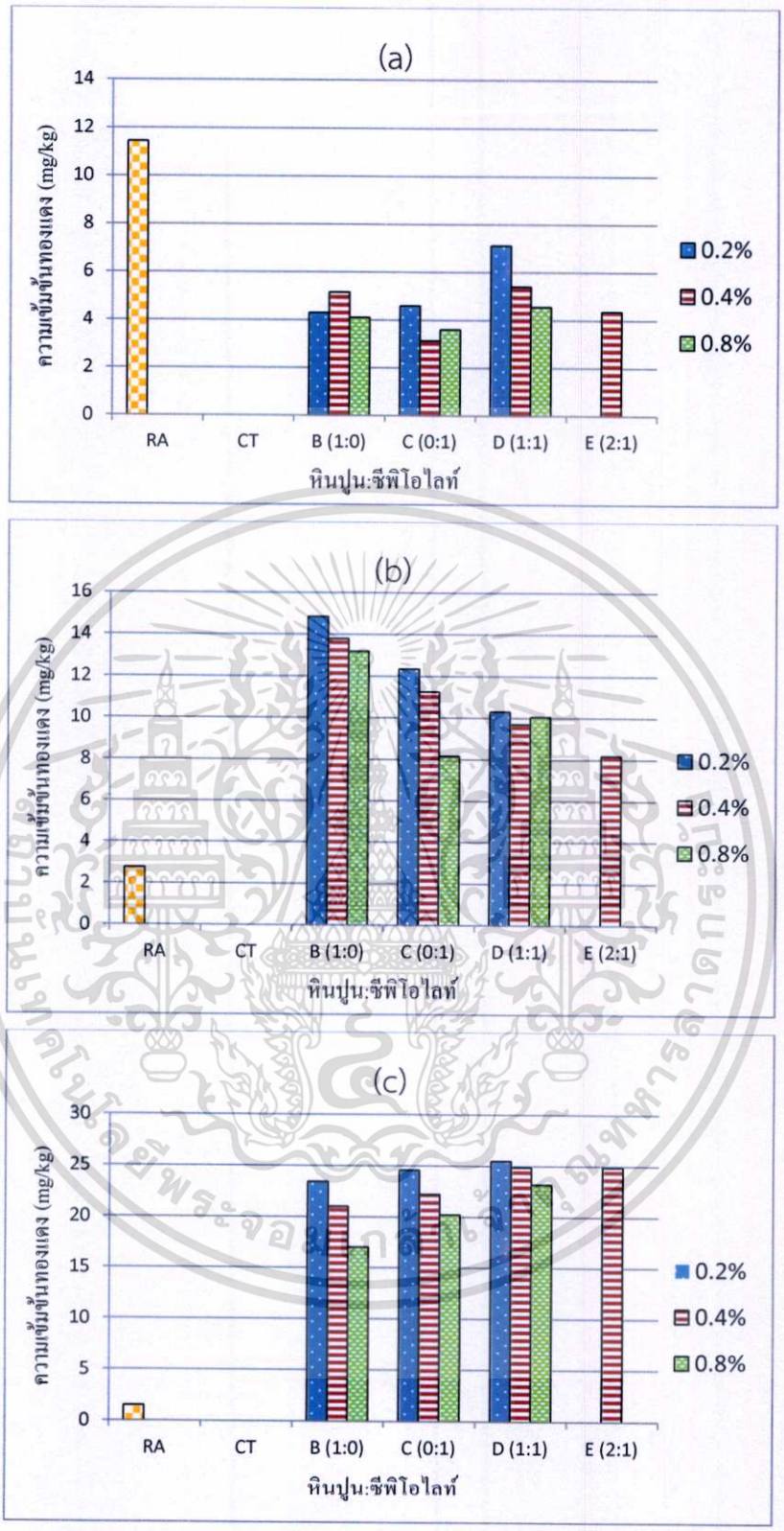
ทำการศึกษาประสิทธิภาพของสารปรับปรุงดินโดยปลูกข้าวในดินปนเปื้อนทองแดง สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม ทำการเติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน:ซีพิโอไลท์) ในอัตราส่วนต่างๆ กัน ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3, 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

### 4.4.1 ทองแดง

จากรูปที่ 4.3 เมื่อเติมสารปรับปรุงในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าทองแดงจะสะสมในส่วนของรากมากที่สุดที่อัตราส่วน 1:1 ที่ความเข้มข้น 0.2% เมื่อเปรียบเทียบทางสถิติพบว่าปริมาณทองแดงที่สะสมในเมล็ด ลำต้นรวมกับใบ และราก มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทุกอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เติมที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่อัตราส่วน 0:1 ความเข้มข้น 0.4% และ 0.8% มีปริมาณทองแดงในเมล็ดน้อยที่สุดคือ 3.13 และ 3.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และที่ลำต้นรวมกับใบที่อัตราส่วน 0:1 ที่ความเข้มข้น 0.8% มีปริมาณทองแดงน้อยที่สุด คือ 8.16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

อย่างไรก็ตามพบว่าอัตราส่วนหินปูน:ซีพิโอไลท์ที่ 1:0, 0:1, 1:1 และ 2:1 ของสารปรับปรุงดินสามารถลดปริมาณทองแดงในเมล็ดข้าวให้ไม่เกินค่ามาตรฐานที่จะนำมาใช้เป็นอาหารมนุษย์ ซึ่งค่ามาตรฐานความเข้มข้นในอาหารกำหนดไว้ไม่เกินที่ 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กระทรวงสาธารณสุข, 2546) ซึ่งการดูดทองแดงของข้าวส่วนหนึ่งอาจเกี่ยวข้องกับรูปฟอร์มของโลหะในดิน (รูปที่ 4.7) ซึ่งพบว่าทองแดงส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.3** ปริมาณทองแดงในเมล็ด (a) ลำต้นรวมกับใบ (b) และราก (c) เมื่อผสมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ

**หมายเหตุ:** control พืชไม่สามารถจะอยู่รอดได้ในสภาวะที่ดินเป็นกรดและปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักสูง

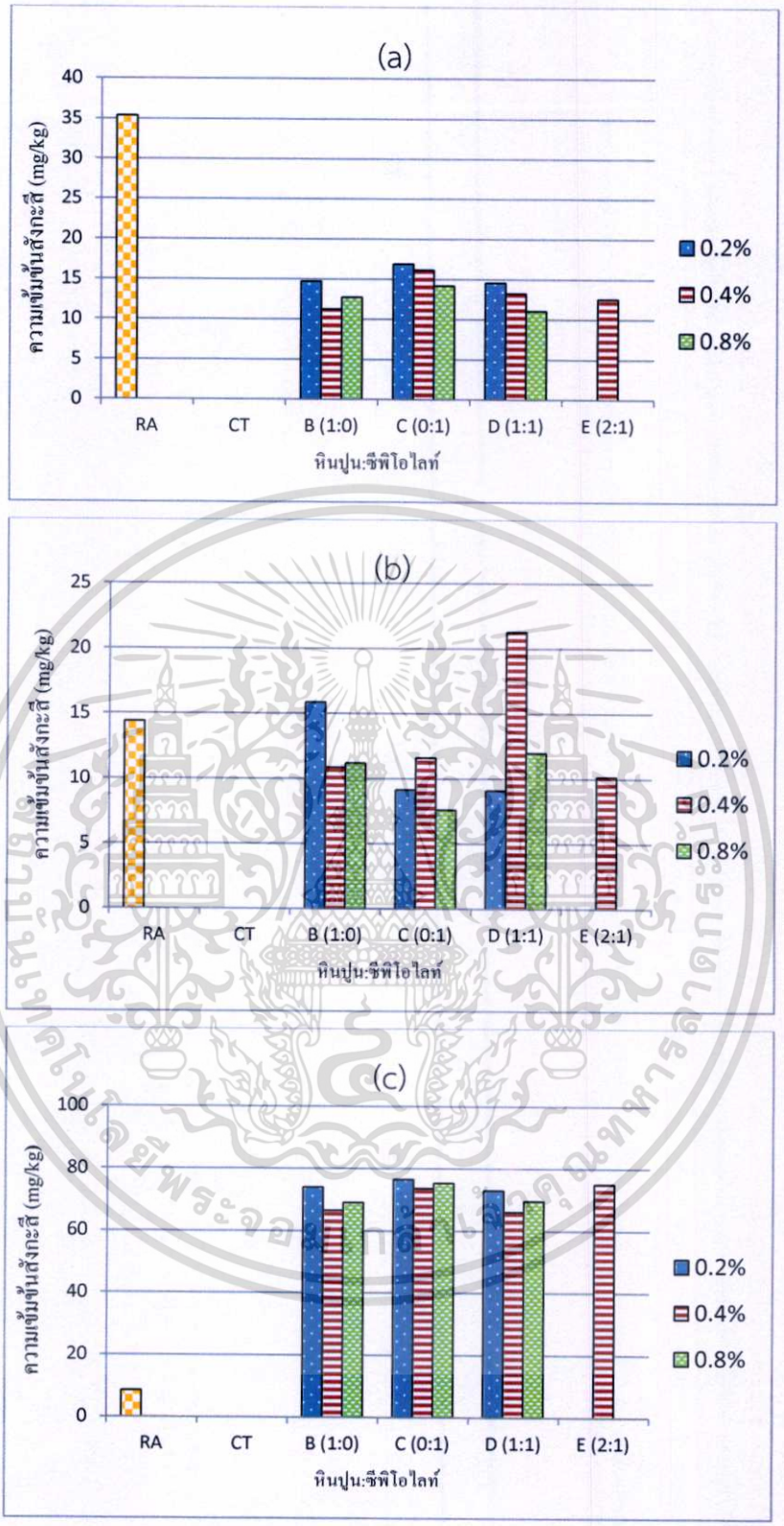
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.4.2 สังกะสี

จากรูปที่ 4.4 เมื่อเติมสารปรับปรุงในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าในส่วนของรากจะมีการสะสมของสังกะสีมากที่สุด และในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารปรับปรุงพบว่าต้นข้าวจะไม่สามารถอยู่รอดได้ เมื่อเปรียบเทียบทางสถิติพบว่าปริมาณสังกะสีที่สะสมในเมล็ด ลำต้นรวมกับใบ และราก มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทุกอัตราส่วนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเติมสารปรับปรุงดินที่อัตราส่วน 1:1 ความเข้มข้น 0.4% มีปริมาณสังกะสีในรากน้อยที่สุดคือ 66.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบทางสถิติพบว่าปริมาณสังกะสีในรากไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่อัตราส่วน 1:1 ที่ความเข้มข้น 0.8% มีปริมาณสังกะสีในเมล็ดน้อยที่สุดคือ 11.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และที่ลำต้นรวมกับใบที่อัตราส่วน 0:1 ที่ความเข้มข้น 0.8% มีปริมาณสังกะสีน้อยที่สุด คือ 7.63 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

อย่างไรก็ตามพบว่าอัตราส่วน 1:0, 0:1, 1:1 และ 2:1 ในทุกความเข้มข้นของสารปรับปรุงดินสามารถลดปริมาณสังกะสีในเมล็ดข้าวให้ไม่เกินค่ามาตรฐานที่จะนำมาใช้เป็นอาหารมนุษย์ ซึ่งค่ามาตรฐานความเข้มข้นในอาหารกำหนดไว้ไม่เกินที่ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กระทรวงสาธารณสุข, 2546) ซึ่งการดูดสังกะสีของข้าวส่วนหนึ่งอาจเกี่ยวข้องกับรูปฟอร์มของโลหะในดิน (รูปที่ 4.8) ซึ่งพบว่าสังกะสีส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.4** ปริมาณสังกะสีในเมล็ด (a) ลำต้นรวมกับใบ (b) และราก (c) เมื่อผสมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ

**หมายเหตุ:** control พืชไม่สามารถจะอยู่รอดได้ในสภาวะที่ดินเป็นกรดและปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักสูง

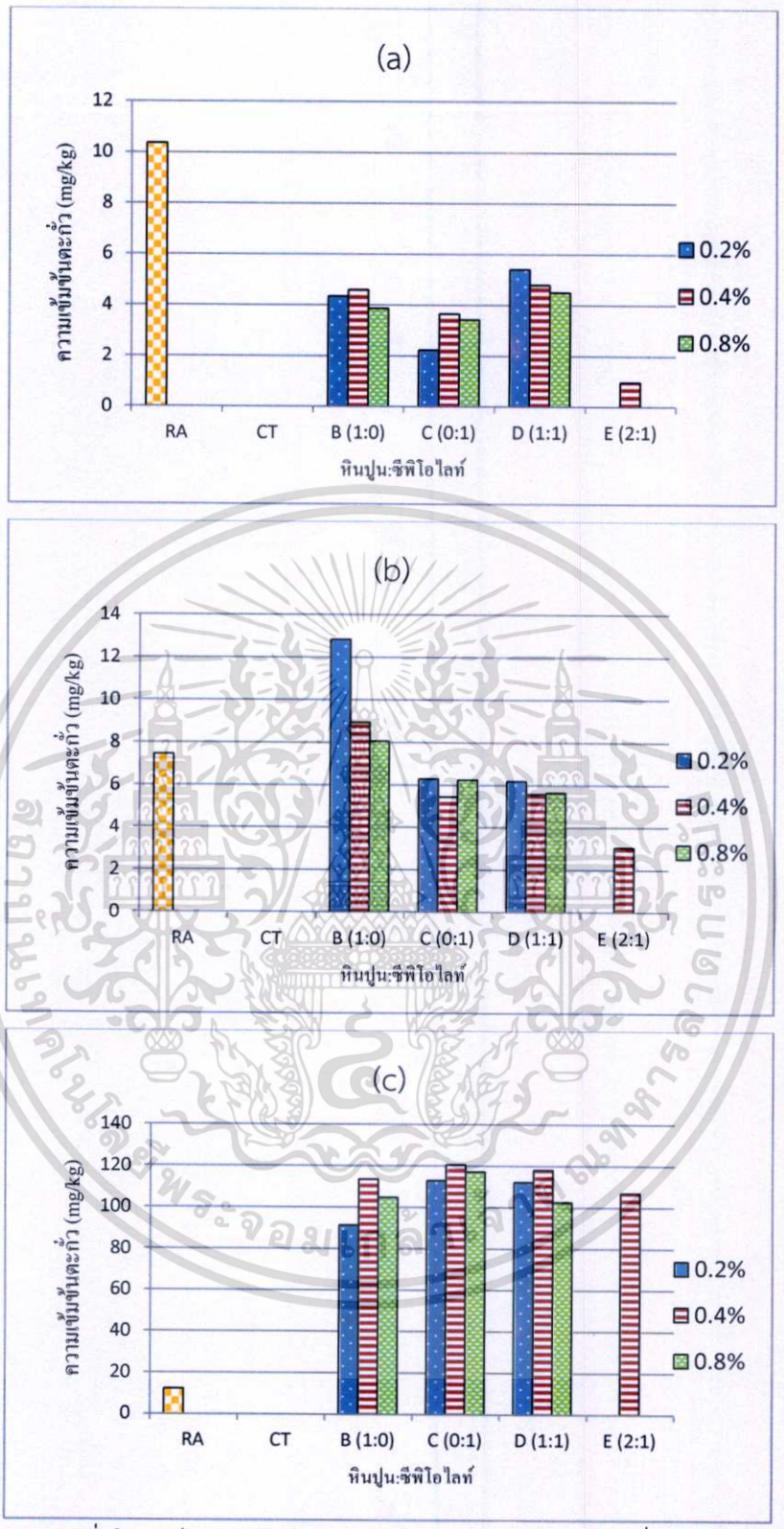
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.4.3 ตะกั่ว**

จากรูปที่ 4.5 เมื่อเติมสารปรับปรุงในอัตราส่วนต่างๆ พบปริมาณตะกั่วในส่วนของรากมากที่สุด และในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารปรับปรุงพบว่าต้นข้าวจะไม่สามารถอยู่รอดได้ เมื่อเปรียบเทียบทางสถิติพบว่าปริมาณตะกั่วที่สะสมในเมล็ด ลำต้นรวมกับใบ และราก มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทุกอัตราส่วนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเติมสารปรับปรุงดินที่อัตราส่วน 1:0 ความเข้มข้น 0.2% มีปริมาณตะกั่วในรากน้อยที่สุดคือ 91.49 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยที่อัตราส่วน 2:1 เมื่อเติมสารปรับปรุงดินลงไป 0.4% จะทำให้ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วสะสมในลำต้นรวมกับใบน้อยที่สุด และความเข้มข้นของตะกั่วที่สะสมในลำต้นรวมกับใบทุกอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และที่อัตราส่วน 2:1 ความเข้มข้น 0.4% มีปริมาณตะกั่วในเมล็ดน้อยที่สุดคือ 0.99 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

อย่างไรก็ตามพบว่าอัตราส่วน 2:1 ความเข้มข้น 0.4% สามารถลดปริมาณตะกั่วในเมล็ดข้าวให้ไม่เกินค่ามาตรฐานที่จะนำมาใช้เป็นอาหารมนุษย์ ซึ่งค่ามาตรฐานความเข้มข้นในอาหารกำหนดไว้ไม่เกินที่ 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กระทรวงสาธารณสุข, 2546) ซึ่งการดูดตะกั่วของข้าวส่วนหนึ่งอาจเกี่ยวข้องกับรูปฟอร์มของโลหะในดิน (รูปที่ 4.9) ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ (F1-F3) ซึ่งสอดคล้องกับผลอัตราส่วนอื่นๆ ที่ยังมีปริมาณตะกั่วในเมล็ดเกินค่ามาตรฐานที่จะนำมาใช้เป็นอาหารมนุษย์ (กระทรวงสาธารณสุข, 2546) แต่เป็นค่าที่ยอมรับได้สำหรับใช้เป็นอาหารสำหรับเลี้ยงสัตว์คือไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Chaney, 1989)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.5** ปริมาณตะกั่วในเมล็ด (a) ลำต้นรวมกับใบ (b) และราก (c) เมื่อผสมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ

**หมายเหตุ:** control พืชไม่สามารถจะอยู่รอดได้ในสภาวะที่ดินเป็นกรดและปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักสูง

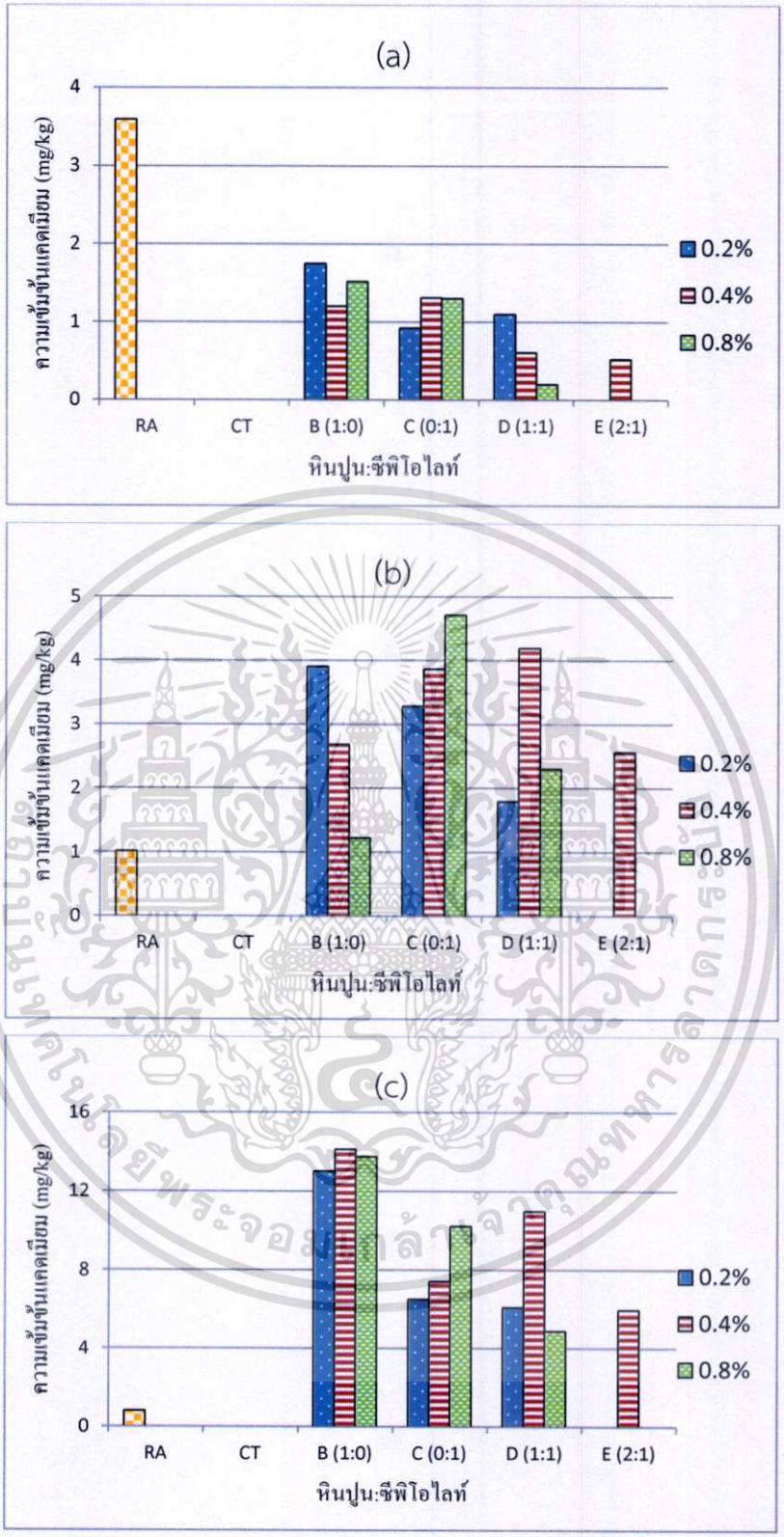
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.4.3 แคดเมียม

จากรูปที่ 4.6 เมื่อเติมสารปรับปรุงในอัตราส่วนต่างๆ พบปริมาณแคดเมียมที่สะสมในเมล็ด ลำต้นรวมกับใบ และราก มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทุกอัตราส่วนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเติมสารปรับปรุงดินที่อัตราส่วน 1:1 ความเข้มข้น 0.8% มีปริมาณแคดเมียมในรากน้อยที่สุดคือ 4.91 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบทางสถิติพบว่าปริมาณแคดเมียมที่สะสมในราก มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทุกอัตราส่วนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่อัตราส่วน 1:0 เมื่อเติมสารปรับปรุงดินลงไป 0.8% จะทำให้ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมสะสมในลำต้นรวมกับใบน้อยที่สุด และที่อัตราส่วน 1:1 ความเข้มข้น 0.8% มีปริมาณแคดเมียมในเมล็ดน้อยที่สุดคือ 0.21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

อย่างไรก็ตามพบว่าอัตราส่วน 1:1 ความเข้มข้น 0.4% และ 0.8% และอัตราส่วน 2:1 ความเข้มข้น 0.4% สามารถลดปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวให้ไม่เกินค่ามาตรฐานที่จะนำมาใช้เป็นอาหารมนุษย์ ซึ่งค่ามาตรฐานความเข้มข้นในอาหารกำหนดไว้ไม่เกินที่ 0.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กระทรวงสาธารณสุข, 2546) ซึ่งการดูดแคดเมียมของข้าวส่วนหนึ่งอาจเกี่ยวข้องกับรูปฟอร์มของโลหะในดิน (รูปที่ 4.10) ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ง่าย ทำให้ข้าวสามารถดูดแคดเมียมไปสะสมได้ในปริมาณที่มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 4.6** ปริมาณแคดเมียมในเมล็ด (a) ลำต้นรวมกับใบ (b) และราก (c) เมื่อผสมสารปรับปรุงดินในอัตราส่วนต่างๆ

**หมายเหตุ:** control พืชไม่สามารถจะอยู่รอดได้ในสภาวะที่ดินเป็นกรดและปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้หินปูนและซีพีโอไลท์ทำให้ปริมาณของโลหะหนักในข้าวมีปริมาณลดลง ซึ่งค่าตารางที่ 4.6 แสดงอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เหมาะสมที่ทำให้โลหะหนักทุกชนิดในเมล็ดมีปริมาณโลหะหนักน้อยที่สุดและไม่เกินค่ามาตรฐานอาหาร

**ตารางที่ 4.6** การประเมินอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เหมาะสมที่ทำให้โลหะหนักทุกชนิดในเมล็ดน้อยที่สุดและไม่เกินค่ามาตรฐานอาหาร

| ตัวอย่าง (หินปูน:ซีพีโอไลท์) | | ปริมาณโลหะไม่เกินค่ามาตรฐานอาหาร | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Cu | Zn | Pb | Cd |
| ดินระยอง (RA) | | | | | |
| ดินควบคุม (CT) | | | | | |
| (1:0) (B) | 0.2% (X) | | | | |
| | 0.4% (Y) | | | | |
| | 0.8% (Z) | | | | |
| (0:1) (C) | 0.2% (X) | | | | |
| | 0.4% (Y) | ● | | | |
| | 0.8% (Z) | | | | |
| (1:1) (D) | 0.2% (X) | | | | |
| | 0.4% (Y) | | | | |
| | 0.8% (Z) | | ● | | ● |
| (2:1) (E) | 0.2% (X) | | | | |
| | 0.4% (Y) | | | ● | |
| | 0.8% (Z) | | | | |

หมายเหตุ: ● คือปริมาณโลหะหนักน้อยที่สุด คืออัตราส่วนที่ไม่เกินค่ามาตรฐานอาหาร

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อดินมีการปนเปื้อนแคดเมียมในปริมาณที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) และมีการปนเปื้อนตะกั่ว สังกะสี และทองแดงในปริมาณที่สูงกว่าค่ามาตรฐานดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ควรเลือกเติมหินปูน:ซีพีโอไลท์ที่อัตราส่วน 1:1 ความเข้มข้น 0.8% ซึ่งสามารถลดปริมาณแคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ให้ผ่านค่ามาตรฐานอาหารได้ แต่ถ้าดินมีการปนเปื้อนแคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี และทองแดงในปริมาณที่สูงกว่าค่ามาตรฐานดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) ควรเลือกเติมหินปูน:ซีพีโอไลท์ที่อัตราส่วน 2:1 ความเข้มข้น 0.4% ซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณแคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี และทองแดงให้ผ่านค่ามาตรฐานอาหารได้ ถึงแม้ปริมาณผลผลิตจะไม่สูงมากนัก แต่มีปริมาณคุณภาพของเมล็ด (ตารางที่ 4.5) และมีความปลอดภัยมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวสามารถดูดแคดเมียมได้มากที่สุด รองลงมาคือ ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhou *et al.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2013) ที่ทำการปลูกข้าวในดินปนเปื้อนโลหะหนัก ซึ่งปริมาณแคดเมียมและตะกั่วจะเคลื่อนที่สู่ข้าวได้ง่ายกว่าโลหะหนักชนิดอื่น เนื่องมาจากรูปฟอร์มของโลหะหนักในดิน โดยที่รูปฟอร์มที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ของโลหะหนักสามารถดูดซับได้ง่ายโดยพืช (Yang *et al.*, 2015) โดยการดูดซับโลหะหนักของพืชส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของดิน และการเติมสารปรับปรุงที่เป็นเบสทำให้ค่าความเป็นกรดด่างของดินเพิ่มขึ้นสามารถลดความสามารถในการละลายและการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน (Garau *et al.*, 2007) และส่งผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนบวกที่พื้นที่ผิวและสารละลาย การแลกเปลี่ยนไอออนและการรวมตัวกับโลหะอื่นๆ (Kirkham, 2006)

โดยหินปูนมีส่วนช่วยในการตรึงโลหะหนัก ลดความสามารถในการละลาย และการเคลื่อนที่ของโลหะหนักด้วยการเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างในดิน และเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน (Zeng *et al.*, 2012) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Carillo *et al.* (2000) ที่ศึกษาพฤติกรรมของแคดเมียมใน $CaCO_3$ พบว่าการดูดซับแคดเมียมไอออนใน $CaCO_3$ จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากค่าความเป็นกรดด่าง ionic strength และ exchangeable ซึ่งที่อัตราส่วน1:0 เป็นการเติมหินปูนเพียงอย่างเดียวอาจไม่ส่งผลดีเท่าที่ควรในการตรึงโลหะหนักหลายชนิด ส่วนซีพีโอไลท์เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนที่สูง อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนได้สูงในชั้นของโครงสร้าง ซึ่งที่อัตราส่วน 0:1 เป็นการเติมซีพีโอไลท์เพียงอย่างเดียวก็สามารถช่วยลดปริมาณโลหะหนักได้พอสมควร ดังนั้นการใช้สารปรับปรุงดินรวม (หินปูนและซีพีโอไลท์) ที่อัตราส่วน 1:1 และ 2:1 ส่งผลให้สามารถลดปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในเมล็ดและลำต้นของข้าวได้มากที่สุด โดยพบว่าสารปรับปรุงรวมทั้งสองชนิดมีกลไกที่แตกต่างกันทำให้เกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันในเวลาเดียวกัน จึงทำให้เกิดความสามารถดูดซับและตรึงโลหะหนักได้ในสองปฏิกิริยาพร้อมกัน (Zeng *et al.*, 2012)

## 4.5 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยวิธีการสกัดลำดับขั้น

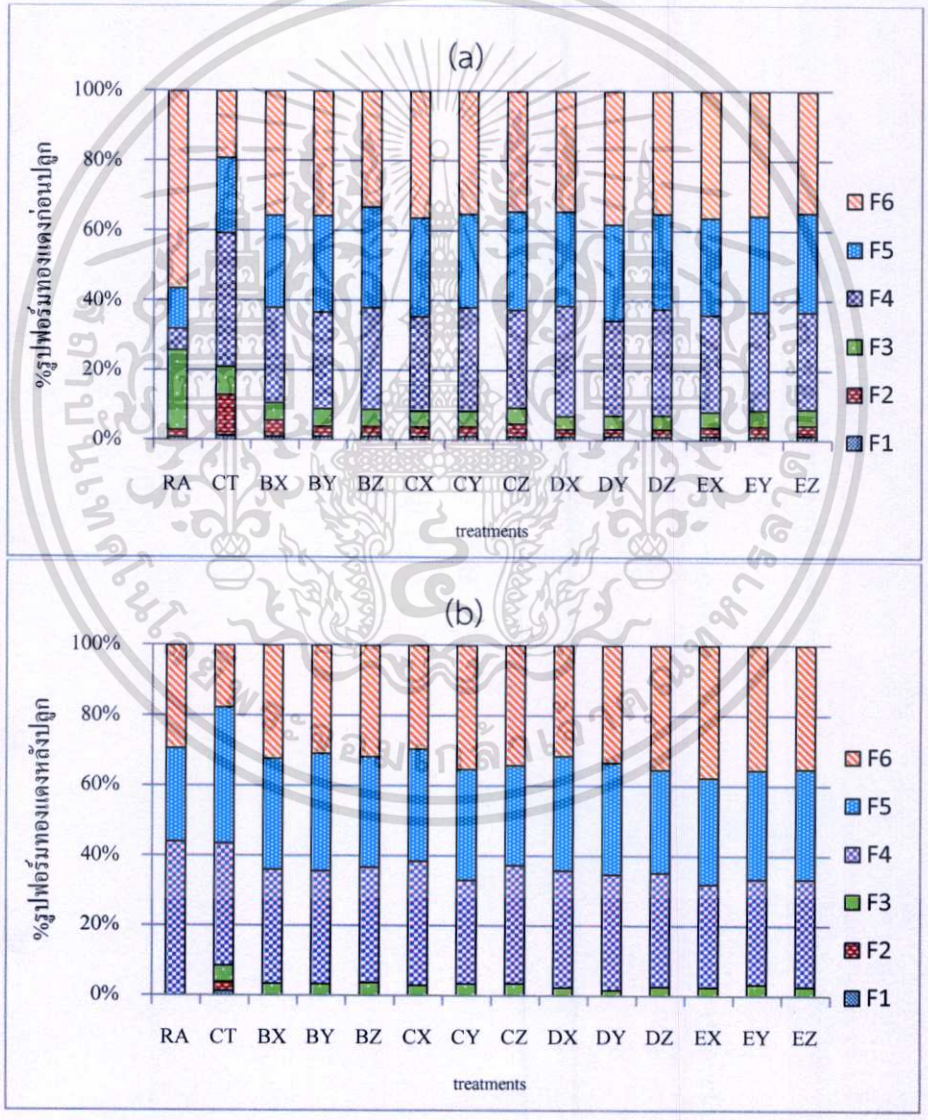
การสกัดลำดับขั้น (Sequential extraction) เป็นการประเมินความเสี่ยงของโลหะหนักที่จะเคลื่อนสู่สิ่งมีชีวิต และมีการแบ่งรูปฟอร์มออกเป็น 6 ส่วน คือ ส่วนที่ละลายน้ำได้ (F1) ส่วนที่แลกเปลี่ยนไอออนได้ (F2) ส่วนที่ตรึงกับคาร์บอเนต (F3) ส่วนที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) ส่วนที่ตรึงกับสารอินทรีย์ (F5) และส่วนที่เหลือตกค้าง (F6) โดยสามารถจำแนกรูปฟอร์มของโลหะตามความสามารถในการเคลื่อนที่ในดินไปยังตัวกลางอื่นๆ รวมทั้งการที่พืชสามารถนำไปใช้ได้นั้นได้สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือรูปฟอร์มที่ไม่เสถียรเป็นรูปฟอร์มที่สามารถเคลื่อนที่สู่สิ่งมีชีวิตได้ง่าย คือ F1-F3 และรูปฟอร์มที่มีความเสถียรเป็นรูปฟอร์มที่สามารถเคลื่อนที่สู่สิ่งมีชีวิตได้ยาก คือ F4-F6 โดยทำการวิเคราะห์ดินสังเคราะห์ที่เติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน:ซีพีโอไลท์) ในอัตราส่วนต่างๆ กัน คือ 1:0 (B), 0:1 (C) 1:1 (D) และ 2:1 (E) ที่ความเข้มข้น 0.2% (X), 0.4% (Y) และ 0.8% (Z) ทั้งก่อนและหลังการปลูกข้าว โดยที่ชุดควบคุมจะไม่มีการเติมสารปรับปรุงดิน (CT) ลงไป

### 4.5.1 ทองแดง

จากรูปที่ 4.7 พบว่าอัตราส่วนต่างๆ กันคือ 1:0 (B), 0:1 (C) 1:1 (D) และ 2:1 (E) ที่ความเข้มข้น 0.2% (X), 0.4% (Y) และ 0.8% (Z) ทั้งก่อนและหลังการปลูกข้าว โดยที่ชุดควบคุมจะไม่มีการเติมสารปรับปรุงดิน (CT) ลงไป รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของทองแดงพบในขั้นที่ 6 คือรูปฟอร์มที่เหลือตกค้าง (F6) เฉลี่ยร้อยละ 35.74 รองลงมาคือขั้นที่ 4 คือรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แมงกานีสออกไซด์ (F4) เฉลี่ยร้อยละ 27.50 สำหรับดินหลังปลูกข้าว พบว่าในทุกอัตราส่วนที่เติมสารปรับปรุงดินลงไป รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของทองแดงพบในขั้นที่ 4 คือรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (F4) เฉลี่ยร้อยละ 33.29 ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Anjan *et al.* (2012) ที่รายงานว่าพบทองแดงได้มากในรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ โดยรูปแบบโลหะที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์เป็นรูปของโลหะที่ดูดซับบนแร่ดินเหนียว และรูปแบบที่ดูดซับบนสารประกอบออกไซด์ (สิทธิชัย, 2558) ซึ่งจากการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของดินตัวอย่าง (ตารางที่ 4.1) มีดินเหนียวเป็นส่วนประกอบซึ่งในแร่ดินเหนียวนี้ประกอบไปด้วยแผ่นอะลูมินาและซิลิกา เมื่อขอบผลึกมีการแตกหักทำให้เกิดประจุลบที่มีการดูดจับแคตไอออนไว้ที่ผิวดินเหนียว (ปฐพีเบื้องต้น, 2548) ส่งผลให้มีการดูดซับทองแดงได้ ทำให้ทองแดงส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) และยังพบว่าทองแดงมีส่วนชะละลายในดินก่อนปลูกและหลังปลูกน้อยมาก




**รูปที่ 4.7** สัดส่วนรูปฟอร์มทองแดงใน (a) ดินก่อนปลูกข้าว และ (b) ดินหลังจากปลูกข้าวแล้วที่วิเคราะห์ด้วยวิธีสกัดแบบลำดับขั้น 6 ขั้นตอน

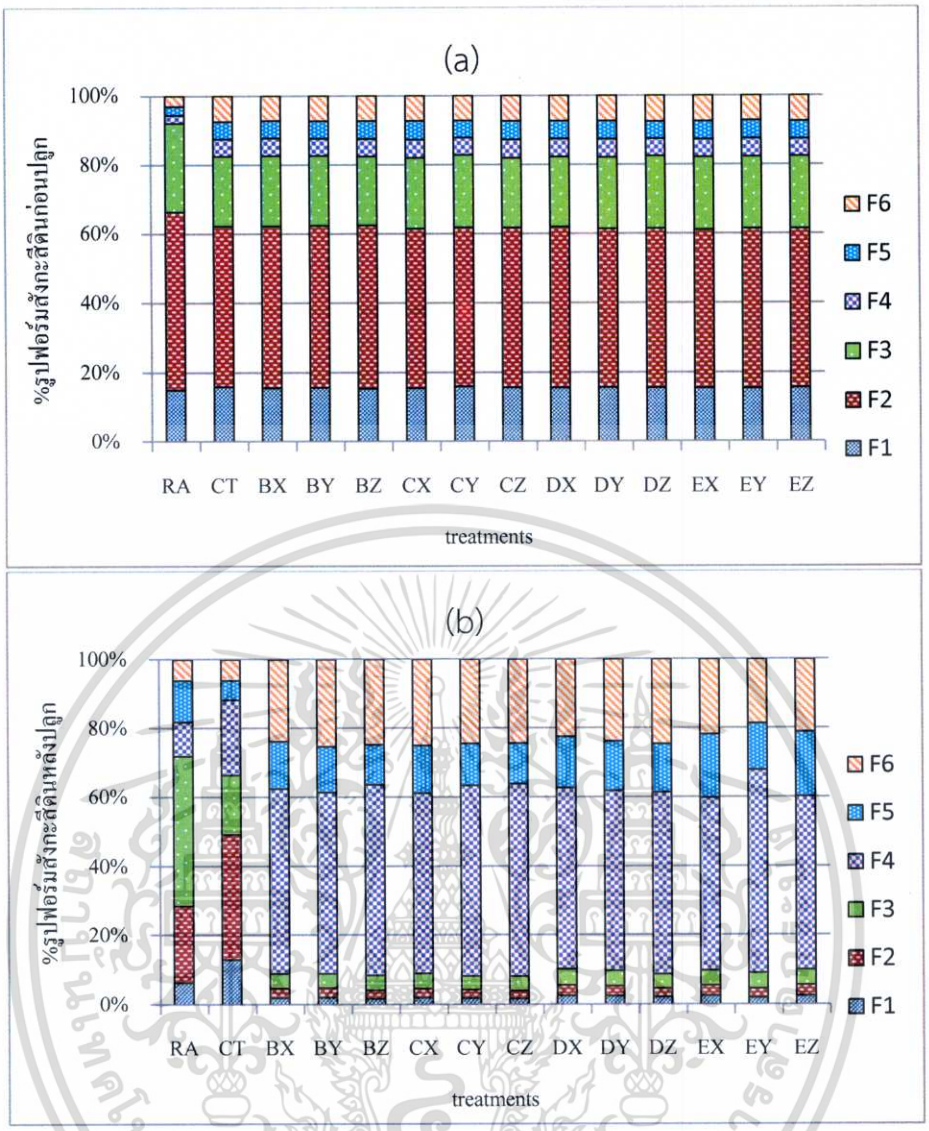
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 ในดินก่อนปลูกข้าว พบว่าที่ชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารปรับปรุงดิน (CT) มีส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ร้อยละ 20.59 ซึ่งทุกอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เติมลงไปสามารถช่วยลดปริมาณทองแดงที่จะเคลื่อนที่สู่สิ่งมีชีวิตได้ เมื่อเปรียบเทียบทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ดินหลังปลูกจะมีรูปฟอร์มที่เสถียร (F4-F6) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้ข้าวดูดทองแดงไปได้ในปริมาณที่น้อย

### 4.5.2 สังกะสี

จากรูปที่ 4.8 พบว่าในทุกอัตราส่วนสารปรับปรุงดินที่เติมลงไปในดิน รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของสังกะสีพบในขั้นที่ 2 คือรูปฟอร์มที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (F2) เฉลี่ยร้อยละ 38.29 รองลงมาคือขั้นที่ 3 คือส่วนที่ตรึงกับคาร์บอเนต (F3) เฉลี่ยร้อยละ 17.38 สำหรับดินหลังปลูกข้าว พบว่าในทุกอัตราส่วนที่เติมสารปรับปรุงดินลงไป รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของสังกะสีพบในขั้นที่ 4 คือรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (F4) เฉลี่ยร้อยละ 47.98 รองลงมาคือขั้นที่ 6 ส่วนที่เหลือตกค้าง (F6) ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yusuf. (2007) ที่รายงานว่าพบสังกะสีได้มากในรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งเป็นรูปแบบโลหะที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ มีลักษณะคล้ายกับทองแดงดังที่กล่าวมาแล้ว (4.5.1 ทองแดง) ส่งผลให้สังกะสีส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ (F4) จากรูปที่ 4.8 ในดินก่อนปลูกข้าว พบว่าที่ชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารปรับปรุงดิน (CT) มีส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ร้อยละ 75.09 ซึ่งทุกอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เติมลงไปสามารถช่วยลดปริมาณสังกะสีที่จะเคลื่อนที่สู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยในดินก่อนปลูกมีรูปฟอร์มที่ไม่เสถียร (F1-F3) มากกว่าในดินหลังปลูก อาจเป็นเพราะพืชมีการดูดรูปฟอร์มเหล่านั้นไปมากแล้ว ทำให้ที่รูปฟอร์มที่เสถียร (F4-F6) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งรูปฟอร์มของดินก่อนปลูกมีความสอดคล้องกับปริมาณสังกะสีที่ข้าวดูดเข้าไป โดยในทุกอัตราส่วนสารปรับปรุงที่เติมลงในดินมีรูปฟอร์มที่ไม่เสถียร (F1-F3) เฉลี่ยประมาณร้อยละ 68.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



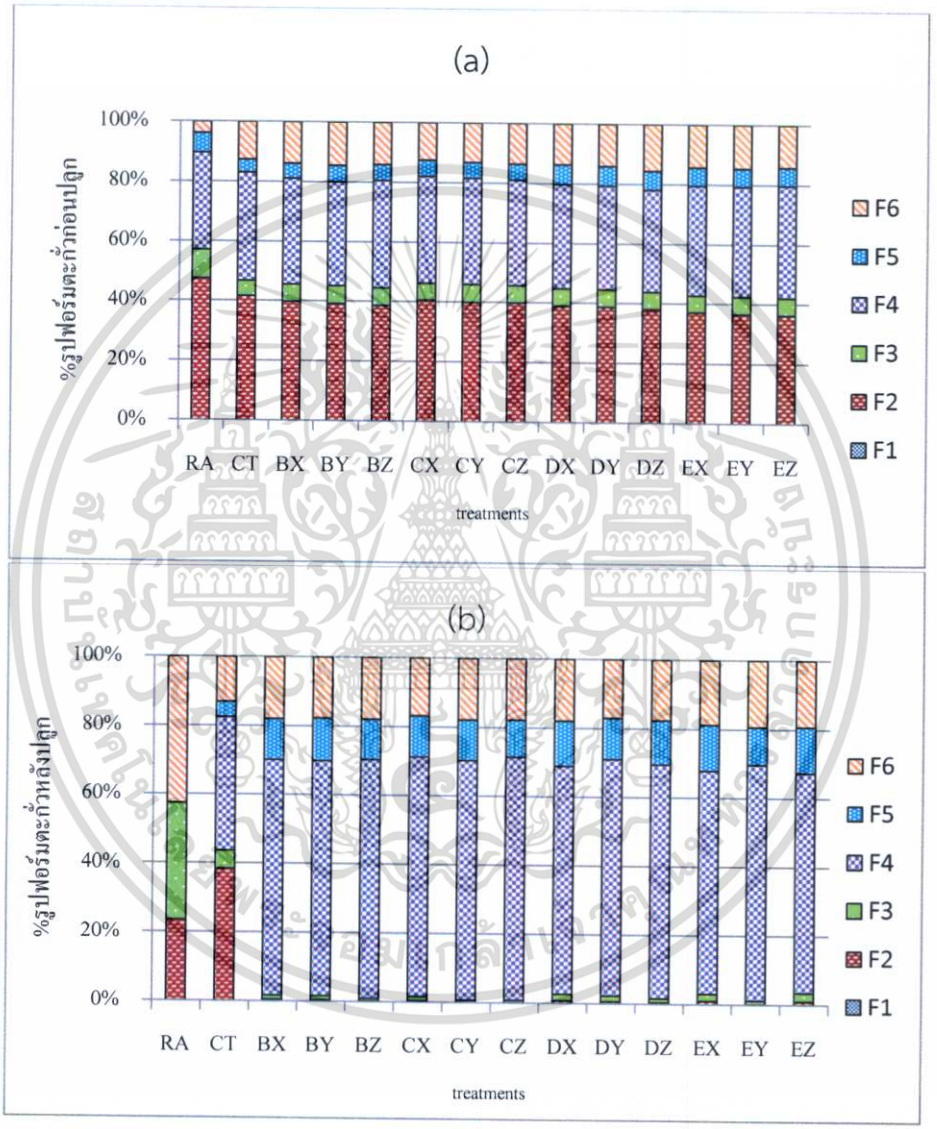

**รูปที่ 4.8** สัดส่วนรูปฟอร์มสังกะสีใน (a) ดินก่อนปลูกข้าว และ (b) ดินหลังจากปลูกข้าวแล้วที่วิเคราะห์ด้วยวิธีสกัดแบบลำดับขั้น 6 ขั้นตอน

### 4.5.3 ตะกั่ว

จากรูปที่ 4.9 พบว่าในทุกอัตราส่วนสารปรับปรุงดินที่เติมลงไปในดิน รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของตะกั่ว พบในขั้นที่ 6 คือรูปฟอร์มที่เหลือตกค้าง (F6) เฉลี่ยร้อยละ 39.80 รองลงมาคือขั้นที่ 2 คือรูปฟอร์มที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (F2) เฉลี่ยร้อยละ 21.73 สำหรับดินหลังปลูกข้าว พบว่าในทุกอัตราส่วนที่เติมสารปรับปรุงดินลงไป รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของตะกั่วพบในขั้นที่ 4 คือรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (F4) เฉลี่ยร้อยละ 61.07 รองลงมาคือขั้นที่ 6 ส่วนที่เหลือตกค้าง (F6) เฉลี่ยร้อยละ 19.35 ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Abad-Valle *et al.* (2016) ที่รายงานว่าพบตะกั่วมากในรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งเป็นรูปแบบโลหะที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ มีลักษณะคล้ายกับทองแดงดังที่กล่าวมาแล้ว (4.5.1 ทองแดง) ส่งผลให้ตะกั่วและส่งผลให้ตะกั่วไม่มีส่วนที่สามารถชะละลาย คือ รูปฟอร์มที่ละลายน้ำได้ (F1) และรูปฟอร์มที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (F2) ลดลง จากรูปที่ 4.9 ในดินก่อนปลูกข้าวในดินก่อนปลูกข้าว พบว่าที่ชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารปรับปรุงดิน (CT) มีส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ร้อยละ

เอกสารนี้มีลิขสิทธิ์ ห้ามมิให้ทำซ้ำ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือรูปแบบอื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50.85 ซึ่งทุกอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เติมลงไปสามารถช่วยลดปริมาณตะกั่วที่จะเคลื่อนที่สู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยในดินก่อนปลูกมีรูปฟอร์มที่ไม่เสถียร (F1-F3) มากกว่าในดินหลังปลูก อาจเป็นเพราะพืชมีการดูดรูปฟอร์มเหล่านั้นไปมากแล้ว ทำให้ที่รูปฟอร์มที่เสถียร (F4-F6) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งรูปฟอร์มของดินก่อนปลูกมีความสอดคล้องกับปริมาณตะกั่วที่ข้าวดูดเข้าไป โดยในทุกอัตราส่วนสารปรับปรุงที่เติมลงในดินมีรูปฟอร์มที่ไม่เสถียร (F1-F3) เฉลี่ยประมาณร้อยละ 23.22 ซึ่งทำให้ข้าวสามารถดูดตะกั่วได้ในปริมาณที่มากรองจากแคดเมียม



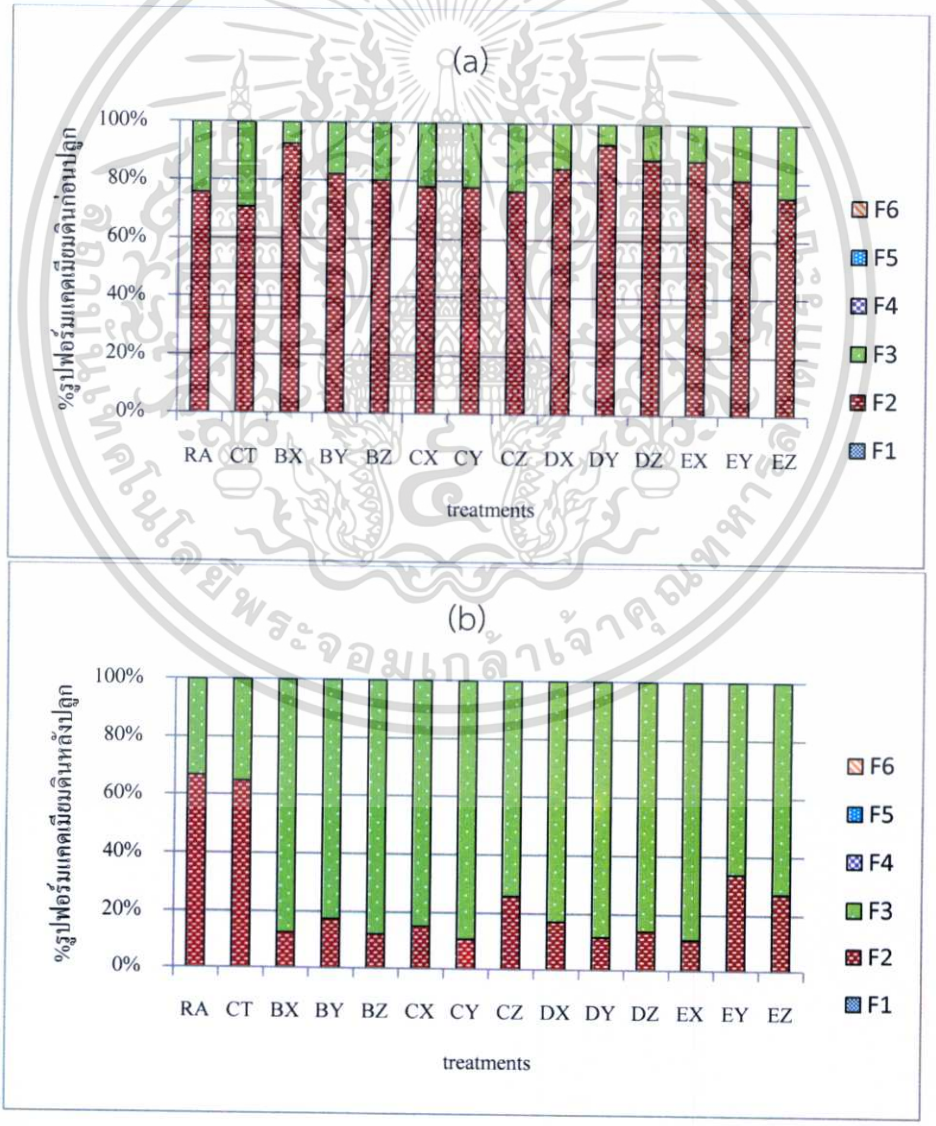

**รูปที่ 4.9** สัดส่วนรูปฟอร์มตะกั่วใน (a) ดินก่อนปลูกข้าว และ (b) ดินหลังจากปลูกข้าวแล้วที่วิเคราะห์ด้วยวิธีสกัดแบบลำดับขั้น 6 ขั้นตอน

### 4.5.4 แคดเมียม

จากรูปที่ 4.10 พบว่าในทุกอัตราส่วนสารปรับปรุงดินที่เติมลงไปในดิน รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของแคดเมียมพบในขั้นที่ 3 รูปฟอร์มที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (F2) คือ เฉลี่ยร้อยละ 81.64 รองลงมาคือขั้นที่ 2 คือ ส่วนที่ตรึงกับคาร์บอเนต (F3) เฉลี่ยร้อยละ 18.36 สำหรับดินหลังปลูกข้าว พบว่าในทุกอัตราส่วนที่เติมสารปรับปรุงดินลงไป รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของแคดเมียมพบในขั้นที่ 3 คือส่วนที่ตรึงกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอเนต (F3) เฉลี่ยร้อยละ 82.73 รองลงมาคือขั้นที่ 2 คือ รูปฟอร์มที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (F2) เฉลี่ยร้อยละ 17.27 ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khaokaew *et al*. (2011) ที่รายงานว่ารูปฟอร์มทางเคมีของแคดเมียมในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปคาร์บอเนต และในดินก่อนปลูกข้าว พบรูปฟอร์มที่ไม่เสถียร (F1-F3) และเป็นรูปที่สามารถเคลื่อนที่ได้เข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ง่ายร้อยละ 100 ในทุกอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เติมลงไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suger *et al*. (2007) ที่รายงานว่ารูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้แคดเมียมละลายในดิน และพืชสามารถดูดไปสะสมในรากได้ และอาจเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติ Hard-Soft Acid-Base ซึ่งรูปฟอร์มที่จับกับออกไซด์และสารอินทรีย์จะมีหมู่ฟังก์ชั่นที่เป็น hard base ซึ่งจะจับได้ดีกับโลหะที่เป็น hard acid (พิเชษฐ, 2555) แต่ในขณะที่แคดเมียมมีความเป็น soft acid มากกว่าโลหะชนิดอื่น (Pb, Zn และ Cu) จึงทำให้เกิดการดูดซับในรูปฟอร์มที่จับกับออกไซด์และสารอินทรีย์ที่น้อย โดยที่แคดเมียมส่วนใหญ่จะจับอยู่กับรูปฟอร์มที่ตรึงกับคาร์บอเนต ซึ่งเป็นรูปฟอร์มที่ไม่เสถียร สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ง่าย จึงทำให้ข้าวสามารถดูดแคดเมียมได้ในปริมาณที่มากกว่าโลหะชนิดอื่น (ตารางที่ 4.7)




**รูปที่ 4.10** สัดส่วนรูปฟอร์มแคดเมียมใน (a) ดินก่อนปลูกข้าว และ (b) ดินหลังจากปลูกข้าวแล้วที่วิเคราะห์ด้วยวิธีสกัดแบบลำดับขั้น 6 ขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาข้างต้นจึงสรุปได้ว่าในทุกอัตราส่วนและปริมาณความเข้มข้นของสารปรับปรุงดินที่เติมลงในดินก่อนและหลังการปลูกข้าว รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของตะกั่ว สังกะสี และทองแดงพบในขั้นที่ 4 คือรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ (F4) แคดเมียมส่วนใหญ่จะพบในขั้นที่ 3 คือรูปฟอร์มที่ตรึงกับคาร์บอเนต (F3) ซึ่งผลการสกัดลำดับขั้นนี้มีความสอดคล้องกับผลของโลหะหนักในข้าวโดยพบว่าข้าวสามารถดูดแคดเมียมได้มากที่สุด รองลงมาคือ ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7) มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาและรายงานว่าหินปูนมีประสิทธิภาพสูงในการลดความสามารถในการละลายน้ำและการเคลื่อนที่ของแคดเมียมและตะกั่วได้ โดยพบว่าทำให้ค่าความเป็นกรดด่างของดินสูงขึ้น สามารถทำให้เกิดการตกตะกอนทางเคมีกับโลหะหนัก เกิดเป็นตะกอนโลหะคาร์บอเนต ทำให้โลหะหนักแลกเปลี่ยนประจุของไฮดรอกไซด์ ซึ่งโลหะหนักจะอยู่ในรูปที่พืชหรือสิ่งมีชีวิตไม่สามารถดูดมาใช้ได้ (Chuasavathi *et al.*, 2011) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Merrington *et al.* (2002) ที่รายงานว่าการเติมหินปูนที่มีคาร์บอเนต ($CO_3^{2-}$) เป็นองค์ประกอบหลักหินปูนจะเพิ่มความสามารถในการจับโลหะหนักด้วยคาร์บอเนต (carbonate bound) และทำให้ปริมาณแคดเมียมที่มีความเป็นพิษลดลง (Chuasavathi *et al.* 2011)

## 4.6 ปัจจัยการสะสมโลหะทางชีวภาพ (Bioaccumulation factor, BAF)

ปัจจัยการสะสมทางชีวภาพ หรือ BAF คืออัตราส่วนของความเข้มข้นของโลหะในพืชต่อความเข้มข้นของโลหะที่เหลือในดินหลังปลูกพืชแล้ว ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงความสามารถในการเคลื่อนย้ายโลหะจากดินไปยังพืช จากการนำข้อมูลความเข้มข้นของทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ในดินหลังปลูกข้าว และส่วนต่างๆ ของข้าวมาคำนวณการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากดินไปสู่ข้าว พบว่าข้าวมีค่าเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากดินสู่ข้าว มีค่า BAF มากกว่า 1 คือ ตะกั่วและแคดเมียม ซึ่งถือว่ามีการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากดินไปสะสมในข้าวมีปริมาณที่สูง โดยข้าวมีค่า BAF การดูดซับแคดเมียม และตะกั่วสูงถึง 21.45±0.00 และ 1.15±0.03 ตามลำดับ ส่วนสังกะสีและทองแดงมีค่า BAF ต่ำกว่า 1 (ตารางที่ 4.7) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้าวสามารถดูดแคดเมียมได้มากที่สุด รองลงมาคือ ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการสกัดลำดับขั้น (4.5.4 แคดเมียม) พบว่าแคดเมียมอยู่ในรูปฟอร์มที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ง่าย ข้าวจึงดูดแคดเมียมได้มากกว่าโลหะหนักชนิดอื่น โดยที่ตะกั่ว สังกะสี ทองแดงส่วนใหญ่อยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ซึ่งสิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ได้ยาก ส่งผลให้ดูดโลหะได้น้อยลง ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhou *et al.* (2013) ที่ทำการปลูกข้าวในดินปนเปื้อนโลหะหนักและให้ผลการทดลองที่เหมือนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.7** การเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากดินสู่ข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนโลหะหนักและเติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน:ซีพีโอไลท์) อัตราส่วนต่างๆ (Mean±S.D.)

| ตัวอย่าง | Cu ข้าว/ดิน | Zn ข้าว/ดิน | Pb ข้าว/ดิน | Cd ข้าว/ดิน |
|---|---|---|---|---|
| RA | 4.16±1.15 | 1.56±0.08 | 0.90±0.07 | 5.92±1.49 |
| CT | NG | NG | NG | NG |
| BX | 0.56±0.08 | 0.75±0.04 | 0.82±0.01 | 18.60±1.88 |
| BY | 0.56±0.07 | 0.68±0.05 | 1.11±0.25 | 9.85±0.00 |
| BZ | 0.39±0.05 | 0.71±0.03 | 1.06±0.09 | 13.64±0.86 |
| CX | 0.57±0.10 | 0.84±0.08 | 1.11±0.01 | 11.28±1.20 |
| CY | 0.52±0.09 | 0.82±0.04 | 1.15±0.08 | 16.56±12.18 |
| CZ | 0.43±0.06 | 0.76±0.11 | 1.15±0.03 | 12.85±4.13 |
| DX | 0.48±0.00 | 0.73±0.00 | 0.98±0.00 | 9.02±0.00 |
| DY | 0.45±0.00 | 0.77±0.00 | 1.22±0.00 | 21.45±0.00 |
| DZ | 0.46±0.03 | 0.71±0.06 | 1.02±0.04 | 7.02±0.00 |
| EX | NG | NG | NG | NG |
| EY | 0.60±0.03 | 0.72±0.05 | 0.93±0.10 | 10.19±3.60 |
| EZ | NG | NG | NG | NG |

หมายเหตุ NG=Non Growth

## 4.7 การวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก (Translocation factor, TF)

การศึกษาอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะหนักในส่วนเหนือดิน (เมล็ด+ลำต้นรวมกับใบ) และราก สามารถบ่งชี้ได้ว่ามีการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากรากไปสู่เมล็ดข้าวมากน้อยเพียงใด จากการนำข้อมูลความเข้มข้นของทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ในเมล็ด ลำต้นรวมกับใบ และรากของข้าว นำมาคำนวณค่าการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก (Translocation factor, TF) จากรากสู่เมล็ด พบว่าแคดเมียมมีการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากรากสู่เมล็ดมากที่สุด รองลงมาคือ ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว ตามลำดับ (ตารางที่ 4.8) โดยการทดลองแสดงให้เห็นว่าทองแดง สังกะสี และตะกั่วมีการเคลื่อนย้ายจากรากสู่เมล็ดต่ำ ซึ่งมีค่า TF ต่ำกว่า 1 เพราะโลหะหนักมักสะสมที่รากเป็นส่วนใหญ่ (Yoon *et al.*, 2006) ทำให้ค่า TF ในเมล็ดข้าวมีค่าต่ำกว่า 1 นอกจากนี้ Ogunkunle *et al.* (2013) ยังรายงานว่า TF ที่มีค่าสูง (>1) เป็นผลมาจากค่าความเป็นกรดด่างของดินที่มีค่าต่ำลง แต่ถ้าค่าความเป็นกรดด่างในดินสูงสามารถตรึงหรือลดการชะล้างของโลหะได้ อีกทั้งขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและพื้นที่ที่มีปนเปื้อนโลหะ และควรหลีกเลี่ยงการบริโภคพืชผักที่มี ค่า TF>1 เพื่อลดความเสี่ยงต่อสุขภาพ (Cui *et al.*, 2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.8** การเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากรากสู่ส่วนเหนือดินของข้าว (เมล็ด+ลำต้นรวมกับใบ) ที่ปลูกในดินปนเปื้อนโลหะหนักและเติมสารปรับปรุงดิน (หินปูน:ซีพิโอไลท์) อัตราส่วนต่างๆ (Mean±S.D.)

| ตัวอย่าง | Cu<br>ส่วนเหนือดิน/ราก | Zn<br>ส่วนเหนือดิน/ราก | Pb<br>ส่วนเหนือดิน/ราก | Cd<br>ส่วนเหนือดิน/ราก |
|---|---|---|---|---|
| RA | 6.06±0.85 | 5.83±0.98 | 1.46±0.07 | 6.23±3.01 |
| CT | NG | NG | NG | NG |
| BX | 0.83±0.16 | 0.42±0.03 | 1.88±0.02 | 0.43±0.05 |
| BY | 0.89±0.03 | 0.34±0.03 | 0.12±0.01 | 0.28±0.06 |
| BZ | 1.06±0.14 | 0.35±0.03 | 0.12±0.03 | 0.21±0.05 |
| CX | 0.70±0.11 | 0.34±0.05 | 0.08±0.01 | 0.66±0.09 |
| CY | 0.63±0.09 | 0.38±0.02 | 0.08±0.02 | 0.74±0.28 |
| CZ | 0.29±0.05 | 0.30±0.06 | 0.08±0.04 | 0.59±0.03 |
| DX | 0.73±0.00 | 0.32±0.00 | 0.13±0.00 | 0.47±0.00 |
| DY | 0.55±0.00 | 0.52±0.00 | 0.08±0.00 | 0.47±0.00 |
| DZ | 0.64±0.16 | 0.34±0.06 | 0.09±0.04 | 0.51±0.01 |
| EX | NG | NG | NG | NG |
| EY | 0.46±0.11 | 0.30±0.06 | 0.04±0.01 | 0.52±0.08 |
| EZ | NG | NG | NG | NG |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5
# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินเพื่อใช้สำหรับการปลูกข้าว พบว่าดินมีลักษณะเป็นดินเหนียวปนทราย เนื้อดินละเอียด มีความเป็นกรดจัด มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) มีค่าเท่ากับ 107.10 มิลลิสมมูลต่อดิน 100 กรัม และมีปริมาณอินทรีวัตถุ (OM) 6.25% ซึ่งดินมีความอุดมสมบูรณ์ค่อนข้างสูง มีปริมาณธาตุที่เป็นประโยชน์พืชปานกลาง ส่วนปริมาณโลหะหนัก (Cu, Zn, Pb และ Cd) มีค่า 3.90, 15.32, 31.02 และ 102.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าระดับเกณฑ์พื้นฐานของดินประเทศไทยที่กำหนดไว้

5.1.2 จากการศึกษาปริมาณสมบัติของสารปรับปรุงดิน พบว่าในหินปูนและซีพิโอไลท์มีปริมาณตะกั่วและแคดเมียมค่อนข้างสูง มีความเป็นเบสในตัววัสดุสูง การวิเคราะห์ด้วย X-ray Fluorescence (XRF) พบว่าหินปูนมีปริมาณแคลเซียม (Ca) เป็นองค์ประกอบสูงถึง 60.2% รองลงมาคือออกซิเจน (O) 28.2% ส่วนซีพิโอไลท์มีปริมาณออกไซด์ของซิลิกอน (Si) มากที่สุดร้อยละ 27.2% รองลงมาคือแมกนีเซียมออกไซด์ (Mg) 19.5% ซึ่งของออกไซด์ของสารปรับปรุงดิน มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง มีผลต่อการตรึงโลหะหนัก แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิว ปริมาตรและขนาดรูพรุนของสารปรับปรุงดินโดยใช้เทคนิคตามทฤษฎีของ Brunauer Emmett Teller (BET) พบว่าซีพิโอไลท์มีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนที่มาก ดังนั้นซีพิโอไลท์อาจให้ผลการดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าหินปูน ซึ่งเมื่อพื้นที่ผิวมากความสามารถในการดูดซับและแรงยึดเกาะก็จะมากขึ้น อีกทั้งโครงสร้างขนาดและปริมาตรรูพรุนมีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับอีกด้วย และเมื่อมีการผสมทั้งสองชนิดรวมกันอาจจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับและตรึงโลหะหนักในดินได้ดี

5.1.3 จากการศึกษาผลผลิตของข้าวพบว่าโลหะหนักและสารปรับปรุงเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อน้ำหนักแห้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของเมล็ดข้าว เมื่อเติมสารปรับปรุงดินที่อัตราส่วนหินปูนต่อซีพิโอไลท์ 1:0 ที่ความเข้มข้น 0.2% ผลผลิตของข้าวมากที่สุด และที่อัตราส่วน 1:1 ที่ความเข้มข้น 0.4% มีผลผลิตน้ำหนักแห้งเชิงคุณภาพ 1,000 เมล็ดมากที่สุดคือ 10.61 กรัม จากการวัดความสูงต้นข้าวพบว่าไม่สอดคล้องกับปริมาณผลผลิตของข้าว แต่ความสูงมีความสอดคล้องกับความสูงของต้นข้าวที่ปลูกในดินทั่วไปตามลักษณะพันธุ์

5.1.4 จากการศึกษาปริมาณโลหะหนักในข้าวพบว่าการใช้หินปูนและซีพิโอไลท์ทำให้ปริมาณโลหะหนักในข้าวลดลง โดยที่ชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารปรับปรุงดิน ต้นข้าวไม่สามารถเจริญเติบโตได้ อาจเนื่องมาจากดินมีความเป็นกรดและมีสภาวะการปนเปื้อนโลหะหนักสูง จึงสรุปได้ว่าควรเลือกเติมหินปูนต่อซีพิโอไลท์ที่อัตราส่วน 2:1 ที่ความเข้มข้น 0.4% ซึ่งสามารถช่วยลดปริมาณแคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี และทองแดงให้ผ่านค่ามาตรฐานอาหารได้

5.1.5 จากการศึกษารูปฟอร์มของโลหะหนักพบว่าในทุกอัตราส่วนของสารปรับปรุงดินที่เติมลงไปในดินก่อนและหลังการปลูกข้าว รูปฟอร์มส่วนใหญ่ของตะกั่ว สังกะสี และทองแดงจะอยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (F4) ส่วนแคดเมียมจะอยู่ในรูปฟอร์มที่ตรึงกับคาร์บอเนต (F3) สรุปได้ว่าในดินก่อนปลูกมีรูปฟอร์มที่ไม่เสถียร (F1-F3) มากกว่าในดินหลังปลูก อาจเพราะพืชมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดรูปฟอร์มเหล่านั้นไป ทำให้ในดินหลังปลูกมีรูปฟอร์มที่เสถียร (F4-F6) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งรูปฟอร์มของโลหะหนักมีความสอดคล้องกับปริมาณโลหะหนักที่ข้าวดูดไป

5.1.6 จากการศึกษาการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากปัจจัยการสะสมทางชีวภาพ (BAF) พบว่าข้าวสามารถดูดแคดเมียมได้มากที่สุด รองลงมาคือ ตะกั่ว สังกะสี และทองแดง ตามลำดับ (Cd>Pb>Zn>Cu) ซึ่งถือว่ามีความเสี่ยงสูงมากที่จะเคลื่อนย้ายสู่สิ่งมีชีวิตในแคดเมียม และตะกั่ว และจากการศึกษาการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากรากขึ้นสู่ส่วนเหนือดิน (TF) พบว่าแคดเมียมมีการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากรากขึ้นสู่ส่วนเหนือดินมากที่สุด รองลงมาคือ ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว ตามลำดับ (Cd>Cu>Zn>Pb)

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาในระยะยาว เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยต่างๆ ที่อาจมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในดิน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรดด่าง ในดินฤดูกาลที่แตกต่างกัน

5.2.2 ควรมีการศึกษาตัวอย่างดินที่ทำการใส่ปุ๋ย และศึกษาปริมาณโลหะในปุ๋ยด้วย

5.2.3 ควรมีการศึกษาปริมาณโลหะหนักชนิดอื่น และข้าวสายพันธุ์พื้นเมืองของจังหวัดอื่นๆ

5.2.4 ควรมีการศึกษาอัตราส่วนที่ดีที่สุดแปรผันกับปริมาณโลหะหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เอกสารอ้างอิง


กรมวิชาการเกษตร และสหกรณ์. 2548. เอกสารวิชาการระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในดินประเทศไทย. กรุงเทพฯ.

กรมการข้าว. 2560. **องค์ความรู้เรื่องข้าว** (สืบค้นวันที่ 10 ธันวาคม 2560). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.ricethailand.go.th

กรมควบคุมมลพิษ. 2547. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547). **มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่ออยู่อาศัยและเกษตรกรรม.**

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

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น.** พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ : ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 547 หน้า.

ชัชวพร ยิ่งสมบัติ. 2551. "การปรับเสถียรดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยปุ๋ยทริปเปิลซุปเปอร์ฟอสเฟต." กรุงเทพฯ : คณะวิทยาศาสตร์ สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

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

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

ปิยะ ดวงพัตรา. 2553. **สารปรับปรุงดิน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 256 หน้า.

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

ศิริพร แสงจันทร์. 2549. "การสะสมตะกั่วและแคดเมียมในพืชผักและดอกไม้ ที่ปลูกด้วยปุ๋ยหมักจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรร่วมกับปุ๋ยเคมี." พิษณุโลก : วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยนเรศวร.

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2545. **ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 79 หน้า.

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

สัมฤทธิ์ เฟื่องจันทร์. 2528. **แร่ธาตุพืชสวน.** ขอนแก่น : ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 604 หน้า.

สาธารณสุข. 2546. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 273. **เรื่องมาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน (ฉบับที่ 2)**. ราชกิจจานุเบกษา. 16 กรกฎาคม 2546, เล่มที่ 121 ตอนพิเศษที่ 77 ง: 10.

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

สิทธิชัย อินทร์ปนาม. 2558. "รูปของโลหะหนักตามความเข้มข้นของโลหะหนักในดินที่สกัดด้วยวิธี sequential extraction." พิษณุโลก : วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุรัตนา เสนาะ. 2548. "การดูดดึงธาตุโลหะหนักของหญ้าแฝก ทานตะวันและข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสี แคดเมียมและตะกั่ว." วิทยานิพนธ์ปริญญาโท บัณฑิตวิทยาลัย

สุภาพร พงค์ธรพฤกษ์. 2545. "การสะสมตะกั่วและแคดเมียมในพืชผัก." พิษณุโลก : วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยนเรศวร.

โสภาพรรณ จิรนิรัติศัย. 2534. "ปริมาณตะกั่วทองแดง แคดเมียม และสังกะสีในน้ำและดินตะกอนจากชั้นคุณภาพลุ่มน้ำต่างๆ ของลุ่มน้ำแม่กอง." กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย.

อดิเรก แก้วจำรัส. 2528. "การหาปริมาณตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง สังกะสี โครเมียม และเหล็กในดินและน้ำ จากอำเภอสันกำแพง โดยวิธีสเปคโตรสโคปี." เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อนนท์ สุขสวัสดิ์. 2548. **การประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดินนา.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์. 144 หน้า.

อภิชาต โพธิ์สุ. 2536. "ปริมาณตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี ในน้ำ และดินตะกอนจากชั้นคุณภาพลุ่มน้ำต่างๆ บริเวณลุ่มน้ำเลย." กรุงเทพฯ : วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Abad-Valle, P. Álvarez-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. and 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.

Basta, N.T. Ryan, J.A. and Chaney, R.L. 2005. "Trace Element Chemistry in Residual-Treated Soil." Journal of Environmental Quality. 34: 49-63.

Barancikova, G. 2004. "Soil organic matter and humic acids chemical structure of cal calcaric and non-calcaric mollic fluvisol." In Agriculture. 50: 124-131.

Bergaya, F. and Lagaly, G. 2006. "Introduction to Clay Science: Techniques and Applications Introduction to Clay Science: Techniques and Applications." Developments in Clay Science. 5: 1-7.

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.

Chaney, R.L. 1989. "Toxic element accumulation in soils and crops: protecting soil fertility and agricultural food-chains." Inorganic. Contaminants in the Vadose Zone. 140-185.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chen, S.B. Zhu, Y.G. and Ma, Y.B. 2006. "The effect of grain size of rock phosphate amendment on metal immobilization in contaminated soils." Journal of Hazardous Materials. B134: 74-79.

Damodaran, K. Shetty, B. and 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 activity: Environmental implications." Journal of Geochemical Exploration. 111: 160-171.

Friesl, W. Lombi, E. Horak, O. and Wenzel, 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.

Kirkham, M.B. 2006. "Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation and amendments." Geoderma. 137: 19–32.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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. and 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.

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.

Michael, R.P. Paul, R.S. Trudy, J.E. and Norman, R.F. 2008. "Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments." Engineer Research and Development Center.

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.

Narwal, R.P. Singh, B.R. and Salbu, B. 1999. "Association of cadmium, zinc, copper, and nickel with components in naturally heavy metal rich soils studied sequential extractions." Communications in Soil Science and Plant Analysis. 30: 1209–1230.

Panich-pat, T. and Srinives, P. 2009. Partitioning of Lead Accumulation in Rice Plants. Thai Journal of Agricultural Science. 42(1): 35-40.

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 contaminated soils." J. Hazard Mater. 185: 549–574.

Partrick, W.H. Jr. and C.N. Reddy. 1978. "Chemical changes in rice soil" Soils and Rice, IRRI Los Banos Laguna, Philippines. 825.

Peng, J.F. Song, Y.H. and Yuan, P. 2009. "The remediation of heavy metals contaminated sediment." Journal of Hazardous Materials. 161: 633–640.

Perez-de-Mora, A. Madejon, E. Burgos, P. and Cabrera, F. 2006. "Trace element availability and plant growth in a mine-spill-contaminated soil under assisted natural remediation II: Plants." Science of The Total Environment. 363: 38-45.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Puchong, S. 2015. "Study of methane and hydrogen adsorption in activated carbon with nickel on its surface by monte carlo simulation" Suranaree University

Rakesh Sharma, M.S. and Raju, N.S. 2013. "Correlation of heavy metal contamination with soil properties of industrial areas of Mysore, Karnataka, India by cluster analysis." Int. Res. J. Environment Sci. 2(10): 22-27.

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.

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." Analytical Chemistry. 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.

Worachart, W. 2012. "Remediation technologies of heavy metal contaminated soils using phosphate materials" Khon Kaen Agr. J. 40: 373-378

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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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.

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

Yoon, X.J. Zhou, C.Q. and Ma, L.Q. 2006. "Accumulation of Pb, Cu and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site." Science of The Total Environment. 368: 456-464.

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. Zhou, X. Zeng, M. Liao, B.H. Liu, L. Yang, W.T. Wu, Y.M. Qiu, Q.Y. and 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.

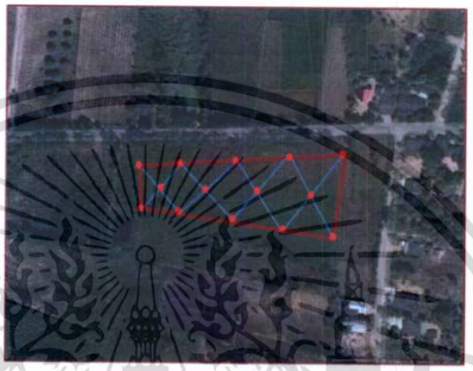
Zhuang, P. Li, Z.A. Zou, B. Xia, H.P. and W, G. 2013. "Heavy metal contamination in soil and soybean near the Dabaoshan Mine, South China." Pedosphere. 23(3): 298-304.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ก
# วิธีการวิเคราะห์ดิน และพืช

## ก.1 การเก็บตัวอย่าง

1. ใช้เสียมขุดดินตามจุดที่กำหนดไว้ใส่ในถุงพลาสติก จนครบทุกจุด
2. เทดินกองลนแผ่นผ้าในและคลุกเคล้าดินให้เป็นเนื้อเดียวกัน จะได้ตัวอย่างดินรวม (composite sample) ใช้เป็นตัวแทนของดินทั้งแปลงนา



**รูปที่ ก-1** การแบ่งพื้นที่ในการเก็บตัวอย่างดินจากแปลงนาจังหวัดระยอง

## ก.2 การเตรียมตัวอย่างดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

1. นำตัวอย่างดินมาผึ่งจนดินแห้ง
2. บดดิน และร่อนด้วยตะแกรงขนาด 20 เมช
3. เก็บแยกดินไว้ในถุงพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

## ก.3 การหาขนาดของอนุภาคดิน (Particle size analysis)

1. ชั่งดินที่ผึ่งและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 20 เมช แล้ว 50 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร 2 ใบ และเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน
2. เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 มิลลิลิตร ตั้งบน Hot plate จนฟองปฏิกิริยาหมด
3. นำบีกเกอร์ที่ 1 ไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C จนแห้ง นำไปชั่งน้ำหนักของดินที่ไล่อินทรียวัตถุออกหมด
4. นำบีกเกอร์ที่ 2 เติมสารละลายคัลกอน 100 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที แล้วเทสารละลายลงกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรสารด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1,130 มิลลิลิตร ทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่
5. ปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์ โดยเทสารละลายคัลกอนจำนวน 100 มิลลิลิตร ลงกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรสารด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1,130 มิลลิลิตร ทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่
6. จุ่มแท่งแก้วคนแบบขึ้น-ลง (plunger) เบาๆ เพื่อให้เกิดการผสมกันอย่างทั่วถึงทั้งกระบอกตวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ค่อยๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงอย่างระมัดระวังสารแขวนลอย และอ่านค่าสเกลเหมือนเดิม
8. เมื่อเวลาผ่านไป 40 วินาที หลังจากการกวนผสมค่าที่อ่านได้ต้องหักลบจากการเปรียบเทียบไฮโดรมิเตอร์
9. ค่อยๆ ดึงไฮโดรมิเตอร์ขึ้นอย่างระมัดระวังเมื่ออ่านเสร็จ ล้างและเช็ดให้สะอาด
10. เมื่อเวลาครบ 2 ชั่วโมง ให้วัดค่าสารแขวนลอยจากไฮโดรมิเตอร์อีกครั้งโดยทำเหมือนเดิม

การคำนวณ

$$\% \text{ (silt + clay)} = \frac{\text{Rs ที่ 40 วินาที X 100}}{\text{น้ำหนักดิน}}$$

$$\% \text{ clay} = \frac{\text{Rs ที่ 2 ชม. X 100}}{\text{น้ำหนักดิน}}$$

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

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

**ก.4 การเตรียมตัวอย่างดินและสารปรับปรุงดินวิเคราะห์ (X-ray Fluorescence, XRF)** (ISO 9516-1)

1. ชั่งตัวอย่างดินและสารปรับปรุงดิน 0.5 กรัม และชั่งกรดบอริก ($H_3BO_3$) 4.5 กรัม บันทึกน้ำหนักรวมทั้งหมด
2. ผสมตัวอย่างกับกรดบอริกให้เข้ากัน โดยใช้เครื่องผสมของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
3. นำตัวอย่างอัดเม็ด และส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ สจล.

**ก.5 การวิเคราะห์หาความชื้น** (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

1. ชั่งบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. นำตัวอย่างดินมาชั่ง 5 กรัม (บันทึกน้ำหนักเปียก) ลงในบีกเกอร์
3. นำไปอบที่อุณหภูมิ 105-110 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักดินคงที่ ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์
4. นำมาชั่งน้ำหนักแห้ง และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

การคำนวณ

$$\text{ความชื้น (\%)} = \frac{\text{(น้ำหนักตัวอย่างดินก่อนอบ – น้ำหนักตัวอย่างดินหลังอบ)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างดินก่อนอบ}} \times 100$$

**ก.6 การวัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH)** (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 10 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนให้ข้ากันหลายๆ ครั้ง ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 30 นาที
3. นำสารละลายดินไปวัดค่า pH ด้วย pH meter โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน pH 7 และ pH 4 ปรับเครื่องวัด pH ก่อนวัดตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ก.7 การวัดค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC)** (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 10 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง กรองหรือเขย่า 30 นาที ทิ้งค้างคืนรุ่งขึ้นกรอง (ถ้าเป็นดินเหนียว ทิ้งค้างคืน แล้วกรอง)
3. ก่อนนำสารละลายดินไปวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดการนำไฟฟ้า ต้องปรับเครื่องด้วยสารละลายมาตรฐาน KCl 0.01 M และ 0.1 M โดยสารละลายมาตรฐาน KCl 0.01 M เครื่องจะอ่านได้ประมาณ 1,423 µS/cm ที่อุณหภูมิ 25 °C หรือสารละลายมาตรฐาน KCl 0.1 M เครื่องจะอ่านได้ประมาณ 129 dS/cm
4. นำสารละลายดิน 1:5 ที่กรองได้ไปวัดค่าการนำไฟฟ้า ด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter)

**ก.8 การหาความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity, CEC)** (EPA 9080 method)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 5-10 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท 1 N ลงไป ประมาณ 60 มิลลิลิตร ปิดจุก เขย่าให้เข้ากัน ทิ้งค้างคืน
2. กรองด้วยระบบสุญญากาศ
3. ชะล้างตัวอย่างดินด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท 1 N จนกระทั่งไม่มีแคลเซียม (Ca) เหลืออยู่ (ทดสอบโดยนำสารละลายส่วนที่ล้างดินแล้วมา 10 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง หยดแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 N 2-3 หยด แอมโมเนียมออกซาเลท 10% และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 50% ไปทำให้เดือด ถ้ามีแคลเซียมเหลืออยู่จะเกิดตะกอนหรือสารละลายขุ่น)
4. ชะดินตัวอย่างต่อ ด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 N 4 ครั้ง และล้างด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.25 N อีก 1 ครั้ง จากนั้นล้างด้วยเอธิลแอลกอฮอล์ 95% ประมาณ 150-200 มิลลิลิตร จนไม่มีคลอไรด์เหลืออยู่ (ทดสอบโดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท ($AgNO_3$ 0.1 N))
5. สำหรับสารละลายดินที่ได้จากข้อ (4) ทิ้งไป และล้างตัวอย่างดินต่อด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (acidified NaCl) 10% เพื่อให้ $Na^+$ ไล่ที่หรือแทนที่ $NH_4^+$ ในดินจนได้สารละลายดินประมาณ 225 มิลลิลิตร
6. เทสารละลายดินที่กรองได้ใส่ในขวดกลั่น (Micro Kjeldahl tube)
7. นำสารละลายดินที่ได้ไปกลั่นเพื่อไล่ $NH_4^+$ ออกมาโดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% ลงไป 25 มิลลิลิตร เพื่อให้สารละลายเป็นด่าง แอมโมเนียที่กลั่นได้จะถูกจับไว้ด้วยสารละลายกรดบอริก 3% 50 มิลลิลิตร
8. นำสารละลายที่ได้จากการกลั่น หยดอินดิเคเตอร์ผสม 5 หยด ทำให้เห็นสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นเขียว แล้วไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 N จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วงที่จุดยุติ
9. ทำ blank กลั่นและไทเทรตเช่นเดียวกับตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

CEC = [(A – B) N x 100] / X cmol/kg

A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (ml)
B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับ blank
N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (N)
X = น้ำหนักเป็นกรัมของตัวอย่างดิน (g)

**ก.9 การวิเคราะห์หาปริมาณอินทรียวัตถุ (Organic Matter, OM) โดยวิธี Walkley and Black** (ASTM F1647-11)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมท 1 N 10 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ
3. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ ประมาณ 1-2 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที (ถ้าสารละลายดินเป็นสีเขียวก่อนไทเทรต แสดงว่ามีสารอินทรีย์อยู่มาก ควรทำการวิเคราะห์ใหม่ โดยชั่งน้ำหนักดินให้น้อยกว่าเดิม)
4. เติมน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ให้เย็น
5. หยดอินดิเคเตอร์ BDS 3-5 หยด สีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงปนน้ำเงิน
6. ไทเทรตด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.5 N ที่หาความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว จนสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเขียวใส
7. ทำ blank เช่นเดียวกับวิธีวิเคราะห์ตัวอย่างดิน ใช้เป็น Method Blank

การคำนวณ

$$\% \text{ Organic matter} = \frac{(B-T)N}{B} \times \frac{100}{77} \times \frac{100}{58} \times \frac{3}{\frac{3}{10}} \times \frac{100}{W} \times 10$$

N = ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดโครเมท (N)
B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับ blank
T = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับตัวอย่างดิน
W = น้ำหนักดิน (g)

**ก.10 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดินและพืช Digest by Acid Method 3050B** (US.EPA, 1996)

1. ชั่งตัวอย่างดินและพืช 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมกรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร นำไปย่อยบนเตาให้ความร้อนโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 80-100°C จนกระทั่งควันสีน้ำตาลหมดไป
3. ย่อยต่อจนสารละลายเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร หรือจนครบ 2 ชั่วโมง
4. เติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร แล้วค่อยๆ เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น ($H_2O_2$) 3 มิลลิลิตร หรือเติมจนกว่าไม่มีฟอง (ไม่เกิน 10 มิลลิลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ย่อยต่อจนสารละลายเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร หรือจนครบ 2 ชั่วโมง
6. เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร ย่อยต่ออีก 15 นาที
7. ทิ้งให้เย็น และกรองสารละลาย แล้วถ่ายสารละลายลงขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
8. กรองผ่าน syring filter 0.45 micron เก็บสารละลายเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

**ก.11 การสกัดลำดับขั้น Sequential extraction** (Tessler *et al.*, 1979)

**ขั้นที่ 1 รูปฟอร์มที่ละลายน้ำได้ (F1)**

1. ชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัม ใส่หลอดเซนติฟิวก์ เติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร เขย่าที่ 25°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส 3,500 รอบ/นาที 20 นาที ถ่ายสารละลายลงขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป
3. นำส่วนของแข็งที่เหลือไปสกัดขั้นตอนต่อไป

**ขั้นที่ 2 รูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนไอออนได้ (F2)**

1. นำส่วนของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 1 มาเติมแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) 1 M 20 มิลลิลิตรเขย่าที่ 25°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส 3,500 รอบ/นาที 20 นาที ถ่ายสารละลายลงขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป
3. นำส่วนของแข็งที่เหลือไปทำการล้างดิน โดยการเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร Ultrasonic 20 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส 3,500 รอบ/นาที 20 นาที เทสารละลายส่วนใสที่ได้ทิ้ง
4. นำส่วนของแข็งที่เหลือไปสกัดขั้นตอนต่อไป

**ขั้นที่ 3 รูปฟอร์มที่ตรึงกับคาร์บอเนต (F3)**

1. นำส่วนของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 2 มาเติมโซเดียมอะซิเตท (NaOAc) 1 M 20 มิลลิลิตร เขย่าที่ 25°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
2. นำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส 3,500 รอบ/นาที 20 นาที ถ่ายสารละลายลงขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับ pH=5 ด้วยกรดอะซิติก แล้วเก็บใส่ขวดพลาสติก
3. นำส่วนของแข็งที่เหลือไปทำการล้างดิน โดยการเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร Ultrasonic 20 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส 3,500 รอบ/นาที 20 นาที เทสารละลายส่วนใสที่ได้ทิ้ง
4. นำส่วนของแข็งที่เหลือไปสกัดขั้นตอนต่อไป

**ขั้นที่ 4 รูปฟอร์มที่ตรึงกับออกไซด์ (F4)**

1. นำส่วนของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 3 มาเติมไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ ($NH_2OH.HCl$) 0.04 M 20 มิลลิลิตร เขย่าที่ 96°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
2. นำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส 3,500 รอบ/นาที 20 นาที ถ่ายสารละลายลงขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเก็บใส่ขวดพลาสติก
3. นำส่วนของแข็งที่เหลือไปทำการล้างดิน โดยการเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร Ultrasonic 20 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส 3,500 รอบ/นาที 20 นาที เทสารละลายส่วนใสที่ได้ทิ้ง
4. นำส่วนของแข็งที่เหลือไปสกัดขั้นตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ขั้นที่ 5 รูปฟอร์มที่ตรึงกับสารอินทรีย์ (F5)**

1. นำส่วนของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 4 มาเติมกรดไนตริก ($HNO_3$) 0.02 M 7.5 มิลลิลิตร แล้วค่อยๆ เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น ($H_2O_2$) 10 มิลลิลิตร เขย่าที่ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำมาค่อยๆ เติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น ($H_2O_2$) 10 มิลลิลิตร เขย่าที่ 80°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
3. นำมาเติมแอมโมเนียมอะซิเตท ($NH_4OAc$) 3.2 M 5 มิลลิลิตร เขย่าที่ 25°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
4. นำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส 3,500 รอบ/นาที 20 นาที ถ่ายสารละลายลงขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเก็บใส่ขวดพลาสติก
5. นำส่วนของแข็งที่เหลือไปทำการล้างดิน โดยการเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร Ultrasonic 20 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส 3,500 รอบ/นาที 20 นาที เทสารละลายส่วนใสที่ได้ทิ้ง
6. นำส่วนของแข็งที่เหลือไปสกัดขั้นตอนต่อไป

**ขั้นที่ 6 รูปฟอร์มที่เหลือตกค้าง (F6)**

1. นำส่วนของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 5 มาเติมกรดไนตริกเข้มข้น ($HNO_3$) 4.6 มิลลิลิตร และเติมไฮโดรคลอริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร กรดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น ($H_2O_2$) 10 มิลลิลิตร ย่อยบนเตาให้ความร้อนโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 80-100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใส 3,500 รอบ/นาที 20 นาที ถ่ายสารละลายลงขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเก็บใส่ขวดพลาสติก
3. นำสารละลายที่สกัดได้แต่ละขั้นมากรองผ่าน syring filter 0.45 micron เก็บสารละลายเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

**ก.12 การเตรียมตัวอย่างพืช** (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551)

1. นำตัวอย่างพืช อบที่อุณหภูมิ 65-70°C จนกระทั่งแห้งสนิท (อุณหภูมิสูงกว่า 70°C อาจจะทำให้องค์ประกอบบางอย่างในพืช เช่น โปรตีนสลายตัว จะทำให้ค่าที่วิเคราะห์ผิดพลาดได้)

2. ในการอบตัวอย่างพืชมักใช้เวลาอบที่ 24 ชั่วโมงหรืออาจนานถึง 48 ชั่วโมง ขึ้นอยู่ขนาดของตัวอย่าง โดยทั่วไปตัวอย่างจะต้องอบกระทั่งได้น้ำหนักแห้งคงที่

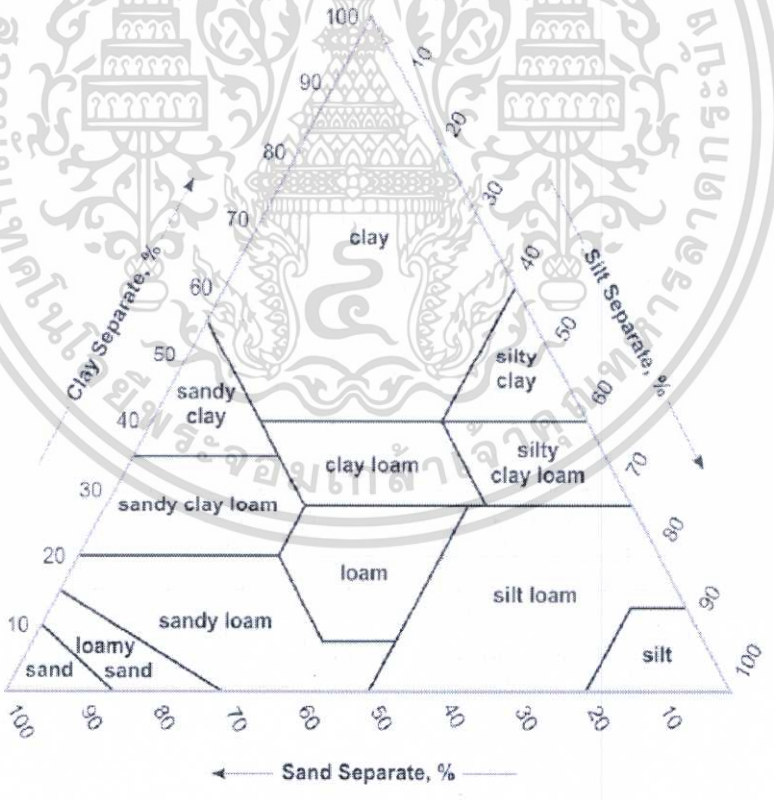
3. เมื่อนำออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิ (ประมาณ 30 นาที) แล้วต้องรีบชั่งน้ำหนักโดยเร็ว มิฉะนั้นพืชที่แห้งจะดูดความชื้นจากอากาศเข้าไปอีกทำให้น้ำหนักแห้งที่บันทึกมากกว่าที่เป็นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ข
# ผลการวิเคราะห์ดินและพืช

ตัวอย่างดินนาจากตำบลบ้านแลง อำเภอเมือง จังหวัดระยอง พิกัดละติจูดที่ 12°37' 45.02" ลองติจูดที่ 101°24' 16.71" เก็บตัวอย่างดินวันที่ 1 สิงหาคม 2558 เป็นชุดดินที่ 6 คือกลุ่มชุดดินบางนาราเป็นกลุ่มดินที่มีเนื้อดินบนเป็นดินเหนียวหรือดินร่วนปนดินเหนียว สีเทาหรือสีเทาปนน้ำตาล เนื้อดินล่างเป็นดินเหนียวหรือดินเหนียวปนทราย สีน้ำตาลอ่อนหรือสีเทา มีจุดประสีน้ำตาลหรือสีเหลืองตลอดชั้นดิน เกิดจากพวกตะกอนลำน้ำพามาทับถมในพื้นที่ราบ เป็นดินลึกมาก มีการระบายน้ำเลว พบบริเวณพื้นที่ราบเรียบถึงค่อนข้างราบเรียบ ดินมีความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติต่ำหรือค่อนข้างต่ำ ปฏิกิริยาดินเป็นกรดจัดถึงกรดแก่ มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างประมาณ 4.5-5.5

ปัญหาสำคัญในการใช้ประโยชน์ที่ดินของ ดินมีความอุดมสมบูรณ์ค่อนข้างต่ำ ดินเหมาะสำหรับทำนา ควรมีการปรับปรุงดินด้วยพืชปุ๋ยสดร่วมปุ๋ยเคมี หรือปุ๋ยอินทรีย์น้ำ ถ้าอยู่ในเขตชลประทานหลังเกี่ยวข้าว สามารถใช้ปลูกพืชไร่ พืชผักได้ ได้แก่ ชุดดินพัทลุง แกลง และท่าศาลา ปัจจุบันบริเวณดังกล่าวใช้ทำนา




**รูปที่ ข-1** ตารางสามเหลี่ยมสำหรับใช้พิจารณาประเภทของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข-1** ผลขนาดของอนุภาคดิน ในดินนาจังหวัดระยอง

| ตัวอย่างดิน | น้ำหนักดิน (g) | ค่าที่อ่านได้จากไฮโดรมิเตอร์ | | %Clay | %Sand | %Silt |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ที่ 40 วินาที | ที่ 2 ชั่วโมง | | | |
| ระยอง | 45.6060 | 19 | 14 | 35.15 | 54.49 | 10.36 |

จากรูปสามเหลี่ยมจำแนกประเภทเนื้อดิน (รูปที่ ข-1) ดินนาจังหวัดระยอง มีเนื้อสัมผัสจัดว่าเป็นดินเหนียวปนทราย (Sand Clay)

**ตารางที่ ข-2** ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุในสารปรับปรุงดินด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

| ตัวอย่าง | ชนิดธาตุ | ปริมาณธาตุ |
|---|---|---|
| หินปูน | Ca | 60.2% |
| | O | 28.2% |
| | Mg | 1.18% |
| | Cu | 0.173% |
| | Fe | 0.208% |
| | Mn | 0.913% |
| | S | 0.180% |
| | Nd | 6.84% |
| | V | 2.07% |
| ซีพิโอไลท์ | O | 45.5% |
| | Si | 27.2% |
| | Mg | 19.5% |
| | Ho | 0.101% |
| | Fe | 0.425% |
| | Ca | 0.277% |
| | S | 0.152% |
| | La | 4.41% |
| | Sm | 2.39% |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข-3** ผลเปอร์เซ็นต์ความชื้นในดินตัวอย่าง

| ตัวอย่าง | ครั้งที่ | ความชื้น | | | ค่าเฉลี่ย | S.D. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | น้ำหนักดินเปียก (g) | น้ำหนักดินแห้ง (g) | ความชื้น (%) | | |
| ระยอง | 1 | 50.2675 | 33.1025 | 51.85 | 47.85 | 4.56 |
| | 2 | 50.5463 | 33.9672 | 48.81 | | |
| | 3 | 50.0069 | 34.9979 | 42.89 | | |

**ตัวอย่างการคำนวณความชื้นในดิน**

จากตัวอย่างดินนาระยองก่อนปลูกข้าว (ตารางที่ ข-3) น้ำหนักดินก่อนอบ เท่ากับ 50.2675 กรัม น้ำหนักดินหลังอบ เท่ากับ 33.1025 กรัม

**จากสูตร**

$$\text{ความชื้น (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างดินก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างดินหลังอบ})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างดินก่อนอบ}} \times 100$$

**แทนค่าในสูตร**

$$\text{ความชื้น (\%)} = \frac{(50.2675 - 33.1025) \times 100}{33.1025}$$

$$\text{ความชื้น (\%)} = 51.85$$

**ตารางที่ ข-4** ผลความเป็นกรดด่างในดินตัวอย่าง

| ตัวอย่าง | ครั้งที่ | ความเป็นกรดด่าง | | ค่าเฉลี่ย | S.D. |
|---|---|---|---|---|---|
| | | น้ำหนักดินแห้ง (g) | pH (1:2) | | |
| ระยอง | 1 | 10.0008 | 3.26 | 3.27 | 0.05 |
| | 2 | 10.0005 | 3.23 | | |
| | 3 | 10.0000 | 3.32 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข-5** ผลค่าการนำไฟฟ้าในดินตัวอย่าง

| ตัวอย่าง | ครั้งที่ | การนำไฟฟ้า | | ค่าเฉลี่ย | S.D. |
|---|---|---|---|---|---|
| | | น้ำหนักดินแห้ง (g) | EC (µg/cm) | | |
| ระยอง | 1 | 10.0008 | 577 | 579.67 | 3.06 |
| | 2 | 10.0005 | 583 | | |
| | 3 | 10.0000 | 579 | | |

**ตารางที่ ข-6** ผลความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินตัวอย่าง

| ตัวอย่าง | ครั้งที่ | ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก | | | | ค่าเฉลี่ย | S.D. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | น้ำหนักดินแห้ง (g) | ปริมาตร HCl (ml) | | CEC (cmol/kg) | | |
| | | | Blank | ตัวอย่าง | | | |
| ระยอง | 1 | 1.0006 | 0.00 | 0.70 | 7.4575 | 7.10 | 0.62 |
| | 2 | 1.0002 | 0.00 | 0.60 | 6.3928 | | |
| | 3 | 1.0002 | 0.00 | 0.70 | 7.4605 | | |

**ตัวอย่างการคำนวณค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)**

จากตัวอย่างดินนาระยองก่อนปลูกข้าว (ตารางที่ ข-6) น้ำหนักดินเท่ากับ 1.0006 กรัม ปริมาตร HCl ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่างเท่ากับ 0.70 มิลลิลิตร ปริมาตร HCl ที่ใช้ไทเทรต Blank เท่ากับ 0.00 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของ HCl เท่ากับ 0.1066 N

**จากสูตร**

$$CEC = [(A - B)\ N \times 100] / X \quad cmol/kg$$

A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (ml)
B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับ blank
N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (N)
X = น้ำหนักเป็นกรัมของตัวอย่างดิน (g)

**แทนค่าในสูตร**

$$CEC = [(0.70 - 0.00)\ 0.1066 \times 100] / 1.0006 \quad cmol/kg$$

$$CEC = 7.46 \quad cmol/kg$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข-7** ผลอินทรียวัตถุในดินตัวอย่าง

| ตัวอย่าง | ครั้งที่ | อินทรียวัตถุ | | | | ค่าเฉลี่ย | S.D. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | น้ำหนักดินแห้ง (g) | ปริมาตร FAS (ml) | | OM (%) | | |
| | | | Blank | ตัวอย่าง | | | |
| ระยอง | 1 | 0.5007 | 19.4 | 10.2 | 6.1937 | 6.09 | 0.14 |
| | 2 | 0.5002 | 19.4 | 10.3 | 6.1325 | | |
| | 3 | 0.5008 | 19.6 | 10.7 | 5.9294 | | |

**ตัวอย่างการคำนวณปริมาณอินทรียวัตถุ (OM)**

จากตัวอย่างดินนาระยองก่อนปลูกข้าว (ตารางที่ ข-7) น้ำหนักดินเท่ากับ 0.5007 กรัม ปริมาตร FAS ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่างเท่ากับ 10.2 มิลลิลิตร ปริมาตร FAS ที่ใช้ไทเทรต Blank เท่ากับ 19.4 มิลลิลิตร ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดโครเมท เท่ากับ 0.9735 N

**จากสูตร**

$$\% \text{ Organic matter} = \frac{(B-T)N}{B} \times \frac{100}{77} \times \frac{100}{58} \times \frac{3}{\frac{3}{10}} \times \frac{100}{W} \times 10$$

N = ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดโครเมท (N)

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับ blank

T = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับตัวอย่างดิน

W = น้ำหนักดิน (g)

**แทนค่าในสูตร**

$$\% \text{ Organic matter} = \frac{(19.4-10.2)\,0.9735}{19.4} \times \frac{100}{77} \times \frac{100}{58} \times \frac{3}{\frac{3}{10}} \times \frac{100}{0.5007} \times 10$$

$$\% \text{ Organic matter} = 6.19$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ข-8** ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ในดินก่อนปลูกข้าว และหลังการปลูกข้าว

| ตัวอย่าง | ดินก่อนการปลูกข้าว | | | | ดินหลังการปลูกข้าว | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | น้ำหนักดิน (g) | pH (1:2) | ค่าเฉลี่ย | SD | น้ำหนักดิน (g) | pH (1:2) | ค่าเฉลี่ย | SD |
| RA1 | 10.0008 | 3.26 | 3.27 | 0.05 | 10.0002 | 5.09 | 5.11 | 0.03 |
| RA2 | 10.0005 | 3.23 | | | 10.0004 | 5.11 | | |
| RA3 | 10.0000 | 3.32 | | | 10.0001 | 5.14 | | |
| CT1 | 10.0005 | 4.44 | 4.44 | 0.04 | 10.0005 | 7.05 | 7.02 | 0.03 |
| CT2 | 10.0002 | 4.41 | | | 10.0002 | 7.02 | | |
| CT3 | 10.0004 | 4.48 | | | 10.0004 | 7.00 | | |
| BX1 | 10.0008 | 5.65 | 5.64 | 0.01 | 10.0008 | 6.90 | 6.94 | 0.04 |
| BX2 | 10.0006 | 5.64 | | | 10.0006 | 6.98 | | |
| BX3 | 10.0008 | 5.64 | | | 10.0008 | 6.95 | | |
| BY1 | 10.0006 | 6.45 | 6.47 | 0.02 | 10.0006 | 7.01 | 7.01 | 0.02 |
| BY2 | 10.0005 | 6.49 | | | 10.0005 | 7.03 | | |
| BY3 | 10.0003 | 6.46 | | | 10.0003 | 7.00 | | |
| BZ1 | 10.0005 | 7.06 | 7.05 | 0.02 | 10.0005 | 7.47 | 7.49 | 0.02 |
| BZ2 | 10.0002 | 7.02 | | | 10.0002 | 7.49 | | |
| BZ3 | 10.0001 | 7.06 | | | 10.0001 | 7.50 | | |
| CX1 | 10.0004 | 5.35 | 5.33 | 0.02 | 10.0004 | 6.78 | 6.79 | 0.01 |
| CX2 | 10.0000 | 5.32 | | | 10.0000 | 6.79 | | |
| CX3 | 10.0001 | 5.31 | | | 10.0001 | 6.79 | | |
| CY1 | 10.0004 | 5.41 | 5.41 | 0.03 | 10.0004 | 6.82 | 6.83 | 0.01 |
| CY2 | 10.0002 | 5.39 | | | 10.0002 | 6.84 | | |
| CY3 | 10.0006 | 5.44 | | | 10.0006 | 6.82 | | |
| CZ1 | 10.0006 | 6.10 | 6.08 | 0.03 | 10.0006 | 7.19 | 7.14 | 0.05 |
| CZ2 | 10.0005 | 6.09 | | | 10.0005 | 7.13 | | |
| CZ3 | 10.0002 | 6.05 | | | 10.0002 | 7.09 | | |
| DX1 | 10.0000 | 7.16 | 7.18 | 0.03 | 10.0000 | 7.04 | 7.02 | 0.02 |
| DX2 | 10.0007 | 7.16 | | | 10.0007 | 7.01 | | |
| DX3 | 10.0002 | 7.22 | | | 10.0002 | 7.02 | | |
| DY1 | 10.0002 | 7.16 | 7.18 | 0.02 | 10.0002 | 7.31 | 7.32 | 0.01 |
| DY2 | 10.0008 | 7.19 | | | 10.0008 | 7.31 | | |
| DY3 | 10.0008 | 7.20 | | | 10.0008 | 7.33 | | |
| DZ1 | 10.0009 | 7.42 | 7.46 | 0.03 | 10.0009 | 7.56 | 7.57 | 0.02 |
| DZ2 | 10.0003 | 7.48 | | | 10.0003 | 7.56 | | |
| DZ3 | 10.0005 | 7.48 | | | 10.0005 | 7.59 | | |
| EX1 | 10.0006 | 6.21 | 6.20 | 0.01 | 10.0006 | 6.85 | 6.83 | 0.02 |
| EX2 | 10.0001 | 6.19 | | | 10.0001 | 6.81 | | |
| EX3 | 10.0009 | 6.21 | | | 10.0009 | 6.83 | | |
| EY1 | 10.0002 | 6.80 | 6.82 | 0.03 | 10.0002 | 6.96 | 6.97 | 0.01 |
| EY2 | 10.0003 | 6.81 | | | 10.0003 | 6.97 | | |
| EY3 | 10.0002 | 6.86 | | | 10.0002 | 6.97 | | |
| EZ1 | 10.0009 | 7.67 | 7.68 | 0.03 | 10.0009 | 7.42 | 7.43 | 0.02 |
| EZ2 | 10.0006 | 7.66 | | | 10.0006 | 7.43 | | |
| EZ3 | 10.0005 | 7.72 | | | 10.0005 | 7.45 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ค
# การเจริญเติบโตของต้นข้าว

**ตารางที่ ค-1** ความสูงของต้นข้าว

| ตัวอย่าง | อายุข้าว (วัน) | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 15 | 22 | 29 | 36 | 43 | 50 | 57 | 64 | 71 | 78 | 85 | 92 | 99 | 106 | 113 | 120 |
| RA1 | 15 | 24 | 32 | 45 | 52 | 61 | 69 | 73 | 76 | 84 | 92 | 105 | 106 | 106 | 106 | 106 |
| RA2 | 15 | 29 | 31 | 48 | 57 | 68 | 72 | 74 | 80 | 84 | 95 | 107 | 107 | 107 | 107 | 107 |
| RA3 | 15 | 26 | 30 | 49 | 58 | 68 | 70 | 75 | 79 | 86 | 95 | 103 | 104 | 104 | 104 | 104 |
| CT1 | 15 | 25 | 29 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| CT2 | 15 | 26 | 28 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| CT3 | 15 | 25 | 29 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| BX1 | 15 | 26 | 33 | 48 | 57 | 69 | 73 | 74 | 79 | 86 | 93 | 110 | 110 | 110 | 110 | 110 |
| BX2 | 15 | 26 | 30 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| BX3 | 15 | 28 | 36 | 50 | 60 | 65 | 71 | 73 | 80 | 88 | 97 | 112 | 112 | 112 | 112 | 112 |
| BY1 | 15 | 24 | 39 | 52 | 55 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| BY2 | 15 | 26 | 37 | 53 | 65 | 72 | 75 | 80 | 90 | 102 | 105 | 110 | 110 | 110 | 110 | 110 |
| BY3 | 15 | 28 | 34 | 49 | 56 | 70 | 72 | 86 | 91 | 109 | 117 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 |
| BZ1 | 15 | 27 | 34 | 49 | 54 | 68 | 71 | 85 | 90 | 108 | 110 | 111 | 112 | 112 | 112 | 112 |
| BZ2 | 15 | 26 | 35 | 50 | 56 | 64 | 72 | 75 | 80 | 82 | 90 | 95 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| BZ3 | 15 | 28 | 32 | 44 | 53 | 64 | 76 | 81 | 86 | 90 | 97 | 101 | 101 | 101 | 101 | 101 |
| CX1 | 15 | 28 | 37 | 50 | 55 | 61 | 70 | 75 | 76 | 83 | 94 | 102 | 102 | 102 | 102 | 102 |
| CX2 | 15 | 28 | 33 | 49 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| CX3 | 15 | 26 | 33 | 48 | 53 | 60 | 64 | 73 | 77 | 81 | 89 | 101 | 101 | 101 | 101 | 101 |
| CY1 | 15 | 26 | 32 | 45 | 51 | 58 | 60 | 65 | 73 | 82 | 86 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| CY2 | 15 | 27 | 36 | 48 | 57 | 69 | 79 | 83 | 95 | 102 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 |
| CY3 | 15 | 29 | 36 | 52 | 67 | 70 | 75 | 82 | 84 | 96 | 104 | 109 | 109 | 109 | 109 | 109 |
| CZ1 | 15 | 28 | 35 | 50 | 56 | 69 | 77 | 84 | 96 | 100 | 116 | 116 | 116 | 116 | 116 | 116 |
| CZ2 | 15 | 28 | 35 | 49 | 52 | 66 | 70 | 73 | 80 | 90 | 100 | 110 | 112 | 112 | 112 | 112 |
| CZ3 | 15 | 30 | 38 | 62 | 68 | 77 | 79 | 86 | 93 | 101 | 102 | 102 | 102 | 102 | 102 | 102 |

**ตารางที่ ค-1** ความสูงของต้นข้าว (ต่อ)

| ตัวอย่าง | อายุข้าว (วัน) | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 15 | 22 | 29 | 36 | 43 | 50 | 57 | 64 | 71 | 78 | 85 | 92 | 99 | 106 | 113 | 120 |
| DX1 | 15 | 27 | 35 | 50 | 53 | 64 | 69 | 75 | 89 | 99 | 100 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 |
| DX2 | 15 | 25 | 31 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| DX3 | 15 | 27 | 31 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| DY1 | 15 | 27 | 32 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| DY2 | 15 | 29 | 30 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| DY3 | 15 | 29 | 35 | 48 | 55 | 64 | 67 | 71 | 82 | 90 | 103 | 104 | 104 | 104 | 104 | 104 |
| DZ1 | 15 | 24 | 32 | 45 | 57 | 68 | 72 | 86 | 91 | 95 | 99 | 100 | 110 | 110 | 110 | 110 |
| DZ2 | 15 | 24 | 35 | 49 | 58 | 69 | 70 | 75 | 79 | 83 | 95 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 |
| DZ3 | 15 | 26 | 32 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| EX1 | 15 | 29 | 30 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| EX2 | 15 | 26 | 31 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| EX3 | 15 | 27 | 30 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| EY1 | 15 | 28 | 30 | 47 | 57 | 73 | 82 | 88 | 95 | 103 | 105 | 119 | 119 | 119 | 119 | 119 |
| EY2 | 15 | 29 | 31 | 50 | 59 | 70 | 80 | 86 | 91 | 98 | 102 | 111 | 111 | 111 | 111 | 111 |
| EY3 | 15 | 28 | 31 | 48 | 52 | 58 | 77 | 88 | 96 | 100 | 101 | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 |
| EZ1 | 15 | 23 | 33 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| EZ2 | 15 | 26 | 32 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| EZ3 | 15 | 24 | 32 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |

หมายเหตุ : NG=Non Growth

มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**ตารางที่ ค-2** น้ำหนักของเมล็ดข้าวและต้นข้าว

| ตัวอย่าง | น้ำหนักเมล็ด (g/pot) | น้ำหนัก 1000 เมล็ด (g) | น้ำหนักต้นข้าวเปียก (g) | น้ำหนักต้นข้าวแห้ง (g) |
|---|---|---|---|---|
| RA1 | 25.04 | 15.95 | 536.64 | 87.44 |
| RA2 | 18.27 | 13.06 | 389.24 | 63.35 |
| RA3 | 19.81 | 14.14 | 412.41 | 67.29 |
| CT1 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| CT2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| CT3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| BX1 | 11.01 | 9.82 | 231.86 | 64.04 |
| BX2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| BX3 | 4.85 | 9.03 | 261.82 | 62.45 |
| BY1 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| BY2 | 1.71 | 8.34 | 38.62 | 7.45 |
| BY3 | 3.03 | 10.19 | 137.25 | 24.55 |
| BZ1 | 1.79 | 8.22 | 198.66 | 50.31 |
| BZ2 | 5.52 | 7.90 | 205.83 | 41.63 |
| BZ3 | 3.18 | 6.90 | 207.26 | 40.98 |
| CX1 | 1.30 | 7.54 | 45 | 10.18 |
| CX2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| CX3 | 2.78 | 8.81 | 115.49 | 30.93 |
| CY1 | 1.18 | 12.74 | 37.28 | 7.9 |
| CY2 | 5.66 | 8.87 | 252.5 | 74.93 |
| CY3 | 3.86 | 10.24 | 152.85 | 40.36 |
| CZ1 | 6.99 | 10.49 | 209.69 | 59.16 |
| CZ2 | 1.79 | 9.99 | 56.25 | 12.18 |
| CZ3 | 4.39 | 10.75 | 116.83 | 23.87 |
| DX1 | 3.84 | 9.43 | 154.69 | 69.87 |
| DX2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| DX3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| DY1 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| DY2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| DY3 | 2.94 | 6.44 | 125.02 | 34.18 |
| DZ1 | 4.79 | 9.60 | 256.81 | 83.3 |
| DZ2 | 6.40 | 8.28 | 253.23 | 63.97 |
| DZ3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| EX1 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| EX2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| EX3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| EY1 | 5.84 | 7.72 | 206.27 | 62.34 |
| EY2 | 6.57 | 11.07 | 231.15 | 74.12 |
| EY3 | 6.24 | 9.95 | 211.81 | 57.88 |
| EZ1 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| EZ2 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| EZ3 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ง
# ผลโลหะหนักในดินและพืช

**ตารางที่ ง-1** ปริมาณทองแดงในข้าว (mg/kg)

| ตัวอย่าง | Cu ในเมล็ด | ค่าเฉลี่ย | SD | Cu ในลำต้น+ใบ | ค่าเฉลี่ย | SD | Cu ในราก | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 11.9964 | 11.43 | 0.90 | 2.2993 | 2.77 | 0.42 | 1.2996 | 1.53 | 0.32 |
| RA2 | 10.3938 | | | 2.8983 | | | 1.8989 | | |
| RA3 | 11.9000 | | | 3.1000 | | | 1.4000 | | |
| CT1 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| CT2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| CT3 | NG | | | NG | | | NG | | |
| BX1 | 4.9970 | 4.30 | 4.30 | 14.1915 | 14.84 | 0.92 | 22.0867 | 23.43 | 1.91 |
| BX2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| BX3 | 3.5975 | | | 15.4892 | | | 24.7827 | | |
| BY1 | NG | 5.15 | 0.49 | NG | 13.80 | 0.42 | NG | 21.04 | 1.62 |
| BY2 | 4.7986 | | | 13.4960 | | | 19.8940 | | |
| BY3 | 5.4978 | | | 14.0944 | | | 22.1911 | | |
| BZ1 | 3.3983 | 4.10 | 0.70 | 14.1929 | 13.19 | 0.87 | 17.2914 | 17.03 | 1.22 |
| BZ2 | 4.7990 | | | 12.7974 | | | 15.6969 | | |
| BZ3 | 4.0980 | | | 12.5937 | | | 18.0910 | | |
| CX1 | 5.6972 | 4.60 | 1.55 | 11.1944 | 12.35 | 1.63 | 28.8856 | 24.59 | 6.07 |
| CX2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| CX3 | 3.5000 | | | 13.5000 | | | 20.3000 | | |
| CY1 | 3.6993 | 3.13 | 0.60 | 10.8978 | 11.26 | 0.72 | 20.7958 | 22.23 | 1.25 |
| CY2 | 2.5000 | | | 10.8000 | | | 23.1000 | | |
| CY3 | 3.1990 | | | 12.0964 | | | 22.7932 | | |
| CZ1 | 3.2970 | 3.60 | 1.08 | 8.0927 | 8.16 | 0.30 | 20.4816 | 20.22 | 0.30 |
| CZ2 | 2.6992 | | | 7.8976 | | | 19.8940 | | |
| CZ3 | 4.7962 | | | 8.4932 | | | 20.2838 | | |
| DX1 | 7.0972 | 7.10 | 0.00 | 8.3966 | 10.30 | 0.00 | 25.4898 | 25.49 | 0.00 |
| DX2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| DX3 | NG | | | NG | | | NG | | |
| DY1 | NG | 5.40 | 0.00 | NG | 9.69 | 0.00 | NG | 24.89 | 0.00 |
| DY2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| DY3 | 5.3968 | | | 9.6942 | | | 24.8851 | | |
| DZ1 | 5.5989 | 4.55 | 1.49 | 10.6979 | 10.05 | 0.92 | 23.0954 | 23.19 | 0.14 |
| DZ2 | 3.4986 | | | 9.3962 | | | 23.2907 | | |
| DZ3 | NG | | | NG | | | NG | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ง-1** ปริมาณทองแดงในข้าว (mg/kg) (ต่อ)

| ตัวอย่าง | Cu ในเมล็ด | ค่าเฉลี่ย | SD | Cu ในลำต้น+ใบ | ค่าเฉลี่ย | SD | Cu ในราก | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EX1 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| EX2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| EX3 | NG | | | NG | | | NG | | |
| EY1 | 5.7988 | 4.37 | 1.32 | 7.9984 | 8.20 | 0.27 | 25.0950 | 24.90 | 0.20 |
| EY2 | 3.2000 | | | 8.5000 | | | 24.9000 | | |
| EY3 | 4.1000 | | | 8.1000 | | | 24.7000 | | |
| EZ1 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| EZ2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| EZ3 | NG | | | NG | | | NG | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ง-2** ปริมาณสังกะสีในข้าว (mg/kg)

| ตัวอย่าง | Zn ในเมล็ด | ค่าเฉลี่ย | SD | Zn ในลำต้น+ใบ | ค่าเฉลี่ย | SD | Zn ในราก | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 38.9883 | 35.39 | 4.25 | 16.9949 | 14.43 | 2.25 | 8.2975 | 8.60 | 0.52 |
| RA2 | 36.4781 | | | 12.7923 | | | 8.2950 | | |
| RA3 | 30.7000 | | | 13.5000 | | | 9.2000 | | |
| CT1 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| CT2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| CT3 | NG | | | NG | | | NG | | |
| BX1 | 15.1909 | 14.74 | 0.64 | 15.9904 | 15.89 | 0.14 | 79.0526 | 74.05 | 7.07 |
| BX2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| BX3 | 14.2900 | | | 15.7889 | | | 69.0517 | | |
| BY1 | NG | 11.30 | 0.28 | NG | 10.90 | 0.28 | NG | 66.58 | 7.78 |
| BY2 | 11.4966 | | | 11.0967 | | | 72.0784 | | |
| BY3 | 11.0956 | | | 10.6957 | | | 61.0756 | | |
| BZ1 | 13.7931 | 12.76 | 1.05 | 11.2944 | 11.23 | 0.12 | 66.0670 | 69.07 | 3.62 |
| BZ2 | 11.6977 | | | 11.2977 | | | 73.0854 | | |
| BZ3 | 12.7936 | | | 11.0945 | | | 68.0660 | | |
| CX1 | 16.7916 | 16.90 | 0.15 | 8.8956 | 9.15 | 0.36 | 84.0580 | 76.58 | 10.58 |
| CX2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| CX3 | 17.0000 | | | 9.4000 | | | 69.1000 | | |
| CY1 | 18.7962 | 16.16 | 2.51 | 10.9978 | 11.63 | 1.19 | 75.0850 | 73.75 | 4.17 |
| CY2 | 15.9000 | | | 13.0000 | | | 77.1000 | | |
| CY3 | 13.7959 | | | 10.8967 | | | 69.0793 | | |
| CZ1 | 14.9865 | 14.19 | 1.14 | 6.3942 | 7.63 | 1.07 | 88.0208 | 75.38 | 12.03 |
| CZ2 | 14.6956 | | | 8.1975 | | | 64.0808 | | |
| CZ3 | 12.8897 | | | 8.2934 | | | 74.0408 | | |
| DX1 | 14.5942 | 14.59 | 0.00 | 9.0964 | 9.10 | 0.00 | 73.0708 | 73.07 | 0.00 |
| DX2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| DX3 | NG | | | NG | | | NG | | |
| DY1 | NG | 13.29 | 0.00 | NG | 21.29 | 0.00 | NG | 66.06 | 0.00 |
| DY2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| DY3 | 13.2920 | | | 21.2872 | | | 66.0604 | | |
| DZ1 | 10.0980 | 11.10 | 1.41 | 14.3971 | 12.00 | 3.39 | 65.0870 | 69.58 | 6.35 |
| DZ2 | 12.0952 | | | 9.5962 | | | 74.0704 | | |
| DZ3 | NG | | | NG | | | NG | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ง-2** ปริมาณสังกะสีในข้าว (mg/kg) (ต่อ)

| ตัวอย่าง | Zn ในเมล็ด | ค่าเฉลี่ย | SD | Zn ในลำต้น+ใบ | ค่าเฉลี่ย | SD | Zn ในราก | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EX1 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| EX2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| EX3 | NG | | | NG | | | NG | | |
| EY1 | 12.2975 | 12.60 | 0.44 | 9.2981 | 10.17 | 1.86 | 79.0842 | 75.09 | 5.29 |
| EY2 | 13.1000 | | | 12.3000 | | | 77.1000 | | |
| EY3 | 12.4000 | | | 8.9000 | | | 69.1000 | | |
| EZ1 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| EZ2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| EZ3 | NG | | | NG | | | NG | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ง-3** ปริมาณตะกั่วในข้าว (mg/kg)

| ตัวอย่าง | Pb ในเมล็ด | ค่าเฉลี่ย | SD | Pb ในลำต้น+ใบ | ค่าเฉลี่ย | SD | Pb ในราก | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 10.7968 | 10.36 | 0.45 | 8.0976 | 7.46 | 0.55 | 13.0961 | 12.20 | 0.86 |
| RA2 | 10.3938 | | | 7.1957 | | | 11.3932 | | |
| RA3 | 9.9000 | | | 7.1000 | | | 12.1000 | | |
| CT1 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| CT2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| CT3 | .NG | | | NG | | | NG | | |
| BX1 | 3.3980 | 4.35 | 1.34 | 12.1927 | 12.84 | 0.92 | 89.8461 | 91.49 | 2.33 |
| BX2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| BX3 | 5.2963 | | | 13.4906 | | | 93.1348 | | |
| BY1 | NG | 4.60 | 1.84 | NG | 8.95 | 0.78 | NG | 113.66 | 19.78 |
| BY2 | 3.2990 | | | 9.4972 | | | 99.6701 | | |
| BY3 | 5.8976 | | | 8.3966 | | | 127.6489 | | |
| BZ1 | 5.3973 | 3.87 | 1.50 | 9.4953 | 8.07 | 1.50 | 102.4488 | 104.79 | 4.83 |
| BZ2 | 3.7992 | | | 8.2184 | | | 101.5797 | | |
| BZ3 | 2.3988 | | | 6.4968 | | | 110.3448 | | |
| CX1 | 2.1189 | 2.24 | 0.18 | 5.3973 | 6.30 | 1.27 | 112.8436 | 113.02 | 0.25 |
| CX2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| CX3 | 2.3700 | | | 7.2000 | | | 113.2000 | | |
| CY1 | 3.0994 | 3.67 | 1.44 | 6.3987 | 5.47 | 0.81 | 121.8756 | 120.71 | 8.63 |
| CY2 | 2.6000 | | | 5.1000 | | | 128.7000 | | |
| CY3 | 5.2984 | | | 4.8985 | | | 111.5665 | | |
| CZ1 | 6.1944 | 3.43 | 2.41 | 8.5923 | 6.26 | 2.17 | 116.5951 | 117.32 | 0.64 |
| CZ2 | 2.2993 | | | 5.8982 | | | 117.5647 | | |
| CZ3 | 1.7986 | | | 4.2966 | | | 117.8058 | | |
| DX1 | 5.3978 | 5.40 | 0.00 | 6.1975 | 6.20 | 0.00 | 112.3551 | 112.36 | 0.00 |
| DX2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| DX3 | NG | | | NG | | | NG | | |
| DY1 | NG | 4.80 | 0.00 | NG | 5.60 | 0.00 | NG | 118.23 | 0.00 |
| DY2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| DY3 | 4.7971 | | | 5.5966 | | | 118.2291 | | |
| DZ1 | 6.4987 | 4.50 | 2.83 | 6.5987 | 5.65 | 1.34 | 102.0796 | 102.62 | 0.76 |
| DZ2 | 2.4990 | | | 4.6981 | | | 103.1587 | | |
| DZ3 | NG | | | NG | | | NG | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ง-3** ปริมาณตะกั่วในข้าว (mg/kg) (ต่อ)

| ตัวอย่าง | Pb ในเมล็ด | ค่าเฉลี่ย | SD | Pb ในลำต้น+ใบ | ค่าเฉลี่ย | SD | Pb ในราก | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EX1 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| EX2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| EX3 | NG | | | NG | | | NG | | |
| EY1 | 1.0998 | 0.99 | 0.11 | 2.5995 | 3.07 | 1.08 | 106.0788 | 107.06 | 2.04 |
| EY2 | 0.9800 | | | 4.3000 | | | 109.4000 | | |
| EY3 | 0.8900 | | | 2.3000 | | | 105.7000 | | |
| EZ1 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| EZ2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| EZ3 | NG | | | NG | | | NG | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ง-4** ปริมาณแคดเมียมในข้าว (mg/kg)

| ตัวอย่าง | Cd ในเมล็ด | ค่าเฉลี่ย | SD | Cd ในลำต้น+ใบ | ค่าเฉลี่ย | SD | Cd ในราก | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 3.8488 | 3.59 | 0.62 | 0.9999 | 1.03 | 0.05 | 0.4998 | 0.8331 | 0.31 |
| RA2 | 2.8883 | | | 1.0900 | | | 0.8998 | | |
| RA3 | 4.0400 | | | 0.9908 | | | 1.0998 | | |
| CT1 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| CT2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| CT3 | NG | | | NG | | | NG | | |
| BX1 | 1.8989 | 1.75 | 0.21 | 4.4287 | 3.91 | 0.73 | 13.5986 | 13.0237 | 0.81 |
| BX2 | NG | | | - | | | - | | |
| BX3 | 1.5989 | | | 3.3976 | | | 12.4488 | | |
| BY1 | NG | 1.20 | 0.14 | NG | 2.69 | 0.64 | NG | 14.1479 | 1.46 |
| BY2 | 1.2996 | | | 2.2400 | | | 15.1785 | | |
| BY3 | 1.0996 | | | 3.1394 | | | 13.1174 | | |
| BZ1 | 1.4093 | 1.52 | 0.17 | 1.0995 | 1.23 | 0.12 | 14.0901 | 13.7683 | 3.32 |
| BZ2 | 1.7197 | | | 1.2999 | | | 16.9198 | | |
| BZ3 | 1.4293 | | | 1.2995 | | | 10.2949 | | |
| CX1 | 0.9895 | 0.92 | 0.09 | 2.9295 | 3.29 | 0.51 | 5.4684 | 6.5392 | 1.51 |
| CX2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| CX3 | 0.8600 | | | 3.6472 | | | 7.6100 | | |
| CY1 | 1.2398 | 1.31 | 0.16 | 4.1996 | 3.87 | 0.59 | 8.6991 | 7.4292 | 1.78 |
| CY2 | 1.2000 | | | 3.1894 | | | 8.1884 | | |
| CY3 | 1.4996 | | | 4.2283 | | | 5.4000 | | |
| CZ1 | 1.5986 | 1.30 | 0.30 | 5.1200 | 4.72 | 0.36 | 10.8978 | 10.2396 | 0.61 |
| CZ2 | 0.9997 | | | 4.6182 | | | 10.1160 | | |
| CZ3 | 1.2990 | | | 4.4287 | | | 9.7051 | | |
| DX1 | 1.0996 | 1.10 | 0.00 | 1.7991 | 1.80 | 0.00 | 6.1163 | 6.1163 | 0.00 |
| DX2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| DX3 | NG | | | NG | | | NG | | |
| DY1 | NG | 0.61 | 0.00 | NG | 4.20 | 0.00 | NG | 10.9945 | 0.00 |
| DY2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| DY3 | 0.6096 | | | 4.1971 | | | 10.2049 | | |
| DZ1 | 0.2200 | 0.20 | 0.02 | 2.3990 | 2.30 | 0.14 | 5.1900 | 4.9093 | 0.40 |
| DZ2 | 0.1899 | | | 2.1998 | | | 4.6286 | | |
| DZ3 | NG | | | NG | | | NG | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ง-4** ปริมาณแคดเมียมในข้าว (mg/kg) (ต่อ)

| ตัวอย่าง | Cd ในเมล็ด | ค่าเฉลี่ย | SD | Cd ในลำต้น+ใบ | ค่าเฉลี่ย | SD | Cd ในราก | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EX1 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| EX2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| EX3 | NG | | | NG | | | NG | | |
| EY1 | 0.2509 | 0.53 | 0.24 | 2.9997 | 2.57 | 0.45 | 5.3189 | 5.9842 | 0.59 |
| EY2 | 0.6120 | | | 2.5995 | | | 6.4568 | | |
| EY3 | 0.7180 | | | 2.0996 | | | 6.1769 | | |
| EZ1 | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG | NG |
| EZ2 | NG | | | NG | | | NG | | |
| EZ3 | NG | | | NG | | | NG | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ง-5** ปริมาณทองแดงทั้งหมด (Total Cu) ในดินก่อนและหลังการปลูกข้าว (mg/kg)

| ตัวอย่าง | Cu ดินก่อนปลูก | Cu เฉลี่ย | SD | Cu ดินหลังปลูก | Cu เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 16.2902 | 15.32 | 0.85 | 4.4682 | 3.97 | 1.04 |
| RA2 | 14.9910 | | | 2.7686 | | |
| RA3 | 14.6927 | | | 4.6700 | | |
| CT1 | 119.2165 | 123.80 | 5.62 | 100.5097 | 120.51 | 22.92 |
| CT2 | 122.1023 | | | 145.5263 | | |
| CT3 | 130.0740 | | | 115.5007 | | |
| BX1 | 125.8867 | 125.20 | 9.07 | 80.2620 | 76.79 | 5.65 |
| BX2 | 115.7958 | | | 79.8381 | | |
| BX3 | 133.9063 | | | 70.2700 | | |
| BY1 | 118.9762 | 126.26 | 8.05 | 72.3700 | 72.30 | 9.50 |
| BY2 | 134.9056 | | | 62.7637 | | |
| BY3 | 124.9126 | | | 81.7618 | | |
| BZ1 | 139.9860 | 123.31 | 15.65 | 86.6094 | 89.90 | 10.39 |
| BZ2 | 108.9564 | | | 101.5395 | | |
| BZ3 | 120.9758 | | | 81.5618 | | |
| CX1 | 119.0000 | 114.66 | 10.21 | 70.7558 | 72.28 | 2.14 |
| CX2 | 121.9756 | | | 71.3557 | | |
| CX3 | 103.0000 | | | 74.7252 | | |
| CY1 | 128.9742 | 118.62 | 9.62 | 84.0112 | 71.54 | 10.85 |
| CY2 | 116.9182 | | | 66.3368 | | |
| CY3 | 109.9560 | | | 64.2636 | | |
| CZ1 | 126.9873 | 123.95 | 7.00 | 67.4700 | 76.02 | 14.40 |
| CZ2 | 115.9420 | | | 67.9428 | | |
| CZ3 | 128.9226 | | | 92.6515 | | |
| DX1 | 137.9172 | 127.95 | 15.60 | 86.3268 | 82.10 | 6.48 |
| DX2 | 135.9592 | | | 85.3273 | | |
| DX3 | 109.9780 | | | 74.6401 | | |
| DY1 | 104.9475 | 120.27 | 13.42 | 96.0412 | 80.44 | 21.17 |
| DY2 | 125.9244 | | | 56.3362 | | |
| DY3 | 129.9480 | | | 88.9344 | | |
| DZ1 | 113.9544 | 122.62 | 9.00 | 81.4130 | 81.81 | 0.73 |
| DZ2 | 121.9878 | | | 81.3700 | | |
| DZ3 | 131.9208 | | | 82.6535 | | |
| EX1 | 117.9292 | 122.31 | 5.88 | 133.5700 | 122.59 | 24.32 |
| EX2 | 128.9871 | | | 94.7132 | | |
| EX3 | 120.0000 | | | 139.4724 | | |
| EY1 | 123.9752 | 121.98 | 10.17 | 68.6494 | 62.34 | 5.53 |
| EY2 | 131.0000 | | | 58.3175 | | |
| EY3 | 110.9556 | | | 60.0520 | | |
| EZ1 | 139.9580 | 126.61 | 11.60 | 130.5439 | 111.81 | 17.69 |
| EZ2 | 120.9154 | | | 109.5043 | | |
| EZ3 | 118.9524 | | | 95.3937 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ง-6** ปริมาณสังกะสีทั้งหมด (Total Zn) ในดินก่อนและหลังการปลูกข้าว (mg/kg)

| ตัวอย่าง | Zn ดินก่อนปลูก | Zn เฉลี่ย | SD | Zn ดินหลังปลูก | Zn เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 100.4397 | 102.44 | 3.47 | 38.8844 | 37.29 | 1.55 |
| RA2 | 100.4397 | | | 37.1814 | | |
| RA3 | 106.4468 | | | 35.8000 | | |
| CT1 | 255.3213 | 255.02 | 2.59 | 243.2540 | 248.94 | 5.51 |
| CT2 | 252.2982 | | | 249.3252 | | |
| CT3 | 257.4485 | | | 254.2475 | | |
| BX1 | 257.2685 | 257.69 | 1.28 | 141.3859 | 156.37 | 28.58 |
| BX2 | 256.6690 | | | 189.3243 | | |
| BX3 | 259.1186 | | | 138.4000 | | |
| BY1 | 257.4485 | 253.37 | 3.54 | 187.4000 | 149.06 | 33.24 |
| BY2 | 251.2241 | | | 131.3869 | | |
| BY3 | 251.4240 | | | 128.3872 | | |
| BZ1 | 251.4749 | 255.44 | 3.58 | 134.3060 | 131.02 | 3.47 |
| BZ2 | 256.3974 | | | 131.3606 | | |
| BZ3 | 258.4483 | | | 127.3873 | | |
| CX1 | 259.5000 | 258.15 | 4.19 | 123.3753 | 145.02 | 38.40 |
| CX2 | 253.4493 | | | 189.3621 | | |
| CX3 | 261.5000 | | | 122.3266 | | |
| CY1 | 250.4499 | 248.06 | 2.14 | 127.3109 | 124.01 | 3.02 |
| CY2 | 246.3276 | | | 123.3383 | | |
| CY3 | 247.4010 | | | 121.3879 | | |
| CZ1 | 244.4756 | 250.07 | 5.44 | 124.4000 | 128.37 | 3.99 |
| CZ2 | 250.3748 | | | 128.3487 | | |
| CZ3 | 255.3468 | | | 132.3735 | | |
| DX1 | 251.3492 | 251.07 | 4.49 | 146.3268 | 174.65 | 24.54 |
| DX2 | 255.4234 | | | 189.3053 | | |
| DX3 | 246.4507 | | | 188.3247 | | |
| DY1 | 257.3713 | 255.37 | 2.01 | 191.3426 | 172.99 | 36.15 |
| DY2 | 253.3480 | | | 196.2822 | | |
| DY3 | 255.3978 | | | 131.3475 | | |
| DZ1 | 252.3990 | 258.74 | 6.01 | 135.3053 | 152.69 | 37.17 |
| DZ2 | 259.4741 | | | 127.4000 | | |
| DZ3 | 264.3414 | | | 195.3609 | | |
| EX1 | 257.3456 | 251.44 | 5.49 | 240.4000 | 242.63 | 3.15 |
| EX2 | 250.4750 | | | 241.2552 | | |
| EX3 | 246.5000 | | | 246.2276 | | |
| EY1 | 263.4473 | 258.12 | 4.74 | 130.3609 | 136.00 | 6.61 |
| EY2 | 256.5000 | | | 143.2711 | | |
| EY3 | 254.3982 | | | 134.3597 | | |
| EZ1 | 249.4252 | 254.38 | 4.32 | 238.3523 | 238.27 | 3.02 |
| EZ2 | 257.3199 | | | 241.2552 | | |
| EZ3 | 256.3974 | | | 235.2118 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ง-7** ปริมาณตะกั่วทั้งหมด (Total Pb) ในดินก่อนและหลังการปลูกข้าว (mg/kg)

| ตัวอย่าง | Pb ดินก่อนปลูก | Pb เฉลี่ย | SD | Pb ดินหลังปลูก | Pb เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 32.0808 | 31.02 | 0.97 | 0.3998 | 0.2332 | 0.15 |
| RA2 | 30.1819 | | | 0.1999 | | |
| RA3 | 30.7846 | | | 0.1000 | | |
| CT1 | 178.9747 | 181.90 | 2.66 | 184.9890 | 183.4414 | 1.95 |
| CT2 | 182.5540 | | | 181.2456 | | |
| CT3 | 184.1632 | | | 184.0895 | | |
| BX1 | 180.5375 | 180.22 | 1.05 | 51.5948 | 55.1906 | 3.24 |
| BX2 | 179.0389 | | | 57.8768 | | |
| BX3 | 181.0732 | | | 56.1000 | | |
| BY1 | 183.1634 | 183.47 | 5.55 | 34.5000 | 36.0309 | 5.85 |
| BY2 | 189.1676 | | | 31.0969 | | |
| BY3 | 178.0753 | | | 42.4958 | | |
| BZ1 | 177.8822 | 180.02 | 2.43 | 53.0629 | 56.8134 | 5.31 |
| BZ2 | 179.5282 | | | 54.4837 | | |
| BZ3 | 182.6635 | | | 62.8937 | | |
| CX1 | 180.1000 | 178.85 | 2.21 | 37.0926 | 41.5521 | 5.07 |
| CX2 | 180.1640 | | | 40.4919 | | |
| CX3 | 176.3000 | | | 47.0718 | | |
| CY1 | 176.6647 | 178.26 | 1.54 | 49.3654 | 51.1128 | 10.22 |
| CY2 | 178.3751 | | | 41.8791 | | |
| CY3 | 179.7281 | | | 62.0938 | | |
| CZ1 | 177.0823 | 177.76 | 0.66 | 24.5000 | 22.0625 | 2.18 |
| CZ2 | 177.8111 | | | 20.2919 | | |
| CZ3 | 178.3930 | | | 21.3957 | | |
| DX1 | 174.7951 | 174.57 | 0.37 | 32.2839 | 35.2170 | 2.54 |
| DX2 | 174.1478 | | | 36.5817 | | |
| DX3 | 174.7650 | | | 36.7853 | | |
| DY1 | 182.5087 | 182.91 | 1.33 | 39.8880 | 37.2176 | 3.48 |
| DY2 | 184.3894 | | | 33.2800 | | |
| DY3 | 181.8273 | | | 38.4846 | | |
| DZ1 | 182.8269 | 182.97 | 0.46 | 41.9706 | 45.9873 | 5.38 |
| DZ2 | 183.4817 | | | 52.1000 | | |
| DZ3 | 182.5904 | | | 43.8912 | | |
| EX1 | 177.5934 | 180.32 | 5.08 | 168.4000 | 170.1595 | 7.90 |
| EX2 | 186.1814 | | | 178.7927 | | |
| EX3 | 177.2000 | | | 163.2857 | | |
| EY1 | 181.0638 | 180.36 | 3.73 | 51.9844 | 55.3049 | 3.61 |
| EY2 | 183.7000 | | | 59.1468 | | |
| EY3 | 176.3295 | | | 54.7836 | | |
| EZ1 | 187.6437 | 187.91 | 1.24 | 189.6621 | 189.7987 | 1.39 |
| EZ2 | 189.2675 | | | 188.4869 | | |
| EZ3 | 186.8253 | | | 191.2470 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ง-8** ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total Cd) ในดินก่อนและหลังการปลูกข้าว (mg/kg)

| ตัวอย่าง | Cd ดินก่อนปลูก | Cd เฉลี่ย | SD | Cd ดินหลังปลูก | Cd เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 3.5978 | 3.90 | 0.36 | 1.0996 | 0.5997 | 0.56 |
| RA2 | 3.7977 | | | 0.6997 | | |
| RA3 | 4.2979 | | | 0.0000 | | |
| CT1 | 4.8966 | 5.03 | 0.32 | 4.1075 | 4.9210 | 1.14 |
| CT2 | 4.7962 | | | 6.2181 | | |
| CT3 | 5.3989 | | | 4.4373 | | |
| BX1 | 5.3951 | 4.70 | 0.82 | 0.9999 | 1.0365 | 0.05 |
| BX2 | 4.8956 | | | 1.0996 | | |
| BX3 | 3.7973 | | | 1.0100 | | |
| BY1 | 4.7990 | 5.00 | 0.35 | 1.7000 | 1.2999 | 0.87 |
| BY2 | 4.7966 | | | 1.8998 | | |
| BY3 | 5.3962 | | | 0.3000 | | |
| BZ1 | 5.0995 | 5.17 | 0.40 | 0.3997 | 0.9331 | 0.50 |
| BZ2 | 4.7981 | | | 1.3996 | | |
| BZ3 | 5.5989 | | | 0.9999 | | |
| CX1 | 4.8000 | 5.00 | 0.20 | 0.8998 | 1.2663 | 0.55 |
| CX2 | 4.9990 | | | 1.8996 | | |
| CX3 | 5.2000 | | | 0.9994 | | |
| CY1 | 5.6989 | 5.40 | 0.30 | 0.0999 | 0.6665 | 0.67 |
| CY2 | 5.3962 | | | 0.4998 | | |
| CY3 | 5.0980 | | | 1.3999 | | |
| CZ1 | 4.8995 | 4.76 | 0.32 | 1.2000 | 1.3664 | 0.47 |
| CZ2 | 4.3978 | | | 0.9996 | | |
| CZ3 | 4.9970 | | | 1.8996 | | |
| DX1 | 4.8971 | 5.40 | 0.44 | 0.9995 | 0.8329 | 0.67 |
| DX2 | 5.6983 | | | 1.3993 | | |
| DX3 | 5.5989 | | | 0.1000 | | |
| DY1 | 6.0970 | 5.26 | 0.72 | 0.3999 | 0.4998 | 0.17 |
| DY2 | 4.7971 | | | 0.3998 | | |
| DY3 | 4.8980 | | | 0.6997 | | |
| DZ1 | 5.4978 | 5.46 | 0.25 | 0.2998 | 0.7332 | 0.38 |
| DZ2 | 5.1995 | | | 1.0000 | | |
| DZ3 | 5.6966 | | | 0.8998 | | |
| EX1 | 5.7965 | 5.70 | 0.46 | 3.6000 | 3.9316 | 0.30 |
| EX2 | 6.0994 | | | 4.1975 | | |
| EX3 | 5.2000 | | | 3.9972 | | |
| EY1 | 4.9990 | 5.00 | 0.10 | 0.5998 | 0.9662 | 0.32 |
| EY2 | 5.1000 | | | 1.0990 | | |
| EY3 | 4.8980 | | | 1.1996 | | |
| EZ1 | 4.8985 | 5.40 | 0.70 | 3.9992 | 3.8979 | 0.10 |
| EZ2 | 5.0964 | | | 3.8977 | | |
| EZ3 | 6.1975 | | | 3.7970 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ง-9** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินก่อนการปลูกข้าวของทองแดง (mg/kg)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 0.2000 | 0.1333 | 0.06 | 0.2000 | 0.3332 | 0.15 | 3.1997 | 3.5325 | 0.31 | 0.9999 | 0.9331 | 0.21 | 1.6998 | 1.7996 | 0.36 | 9.3991 | 8.7313 | 0.58 |
| RA2 | 0.1000 | | | 0.4999 | | | 3.7989 | | | 1.0997 | | | 1.4996 | | | 8.3975 | | |
| RA3 | 0.1000 | | | 0.2999 | | | 3.5989 | | | 0.6998 | | | 2.1993 | | | 8.3975 | | |
| CT1 | 1.6988 | 1.5991 | 0.17 | 13.6904 | 13.8917 | 0.26 | 9.5933 | 9.4610 | 0.15 | 48.3661 | 45.3726 | 2.60 | 24.8826 | 25.4845 | 2.84 | 26.3815 | 22.7195 | 3.21 |
| CT2 | 1.3990 | | | 14.1901 | | | 9.4934 | | | 44.0692 | | | 28.5800 | | | 21.3850 | | |
| CT3 | 1.6993 | | | 13.7945 | | | 9.2963 | | | 43.6825 | | | 22.9908 | | | 20.3918 | | |
| BX1 | 1.0996 | 1.2995 | 0.20 | 5.4978 | 5.7310 | 0.25 | 5.9976 | 6.1308 | 0.51 | 33.4866 | 33.6533 | 1.36 | 33.4866 | 32.4203 | 1.93 | 42.3830 | 43.7161 | 4.17 |
| BX2 | 1.2996 | | | 5.6983 | | | 5.6983 | | | 35.0895 | | | 30.1909 | | | 48.3855 | | |
| BX3 | 1.4993 | | | 5.9970 | | | 6.6967 | | | 32.3838 | | | 33.5832 | | | 40.3798 | | |
| BY1 | 1.4987 | 1.2657 | 0.21 | 3.5968 | 3.5307 | 0.06 | 6.4942 | 6.0622 | 0.38 | 35.8677 | 33.3419 | 3.17 | 30.6724 | 33.2759 | 3.29 | 48.3565 | 43.0348 | 5.50 |
| BY2 | 1.0993 | | | 3.4979 | | | 5.8965 | | | 29.7821 | | | 36.9778 | | | 43.3740 | | |
| BY3 | 1.1992 | | | 3.4976 | | | 5.7959 | | | 34.3759 | | | 32.1775 | | | 37.3738 | | |
| BZ1 | 1.0997 | 1.3326 | 0.25 | 3.3990 | 3.5649 | 0.29 | 5.7983 | 6.0303 | 0.32 | 36.8889 | 36.0484 | 1.88 | 37.4888 | 35.6151 | 3.40 | 43.3870 | 41.0465 | 2.09 |
| BZ2 | 1.5986 | | | 3.3969 | | | 5.8947 | | | 37.3664 | | | 37.6661 | | | 39.3646 | | |
| BZ3 | 1.2996 | | | 3.8988 | | | 6.3981 | | | 33.8898 | | | 31.6905 | | | 40.3879 | | |
| CX1 | 1.0999 | 1.2660 | 0.21 | 3.1997 | 3.3649 | 0.47 | 5.5994 | 5.2972 | 0.36 | 30.7969 | 32.0159 | 1.71 | 31.8968 | 33.5488 | 4.44 | 44.3956 | 43.0436 | 4.16 |
| CX2 | 1.1989 | | | 2.9973 | | | 5.3951 | | | 33.9694 | | | 30.1728 | | | 46.3583 | | |
| CX3 | 1.4991 | | | 3.8977 | | | 4.8971 | | | 31.2812 | | | 38.5769 | | | 38.3770 | | |
| CY1 | 1.4999 | 1.4331 | 0.12 | 3.1997 | 3.4660 | 0.25 | 5.5994 | 5.4989 | 0.10 | 36.9963 | 36.3928 | 0.73 | 33.6966 | 32.8263 | 4.75 | 44.3956 | 43.3915 | 1.74 |
| CY2 | 1.4999 | | | 3.4997 | | | 5.4995 | | | 36.5963 | | | 27.6972 | | | 44.3956 | | |
| CY3 | 1.2995 | | | 3.6985 | | | 5.3978 | | | 35.5858 | | | 37.0852 | | | 41.3834 | | |
| CZ1 | 1.1989 | 1.2992 | 0.10 | 4.8956 | 4.4972 | 0.78 | 5.8947 | 5.3298 | 0.60 | 33.7696 | 33.4123 | 0.91 | 32.1710 | 33.4797 | 3.93 | 38.3655 | 41.0404 | 3.78 |
| CZ2 | 1.3997 | | | 4.9990 | | | 4.6991 | | | 34.0932 | | | 37.8924 | | | 39.3921 | | |
| CZ3 | 1.2990 | | | 3.5971 | | | 5.3957 | | | 32.3741 | | | 30.3757 | | | 45.3637 | | |

**ตารางที่ ง-9** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินก่อนการปลูกข้าวของทองแดง (mg/kg) (ต่อ)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DX1 | 1.5997 | 1.3662 | 0.21 | 2.0996 | 2.6990 | 0.56 | 4.4991 | 4.5985 | 0.10 | 39.3921 | 39.3202 | 0.60 | 36.2927 | 33.6223 | 2.33 | 46.3907 | 43.0525 | 3.06 |
| DX2 | 1.1994 | | | 3.1984 | | | 4.5977 | | | 39.8801 | | | 31.9840 | | | 42.3788 | | |
| DX3 | 1.2996 | | | 2.7992 | | | 4.6986 | | | 38.6884 | | | 32.5902 | | | 40.3879 | | |
| DY1 | 1.1992 | 1.3327 | 0.15 | 2.7980 | 2.5987 | 0.26 | 4.4969 | 4.5312 | 0.15 | 29.3794 | 32.2852 | 2.54 | 32.9769 | 32.8514 | 0.62 | 48.3661 | 45.3784 | 2.63 |
| DY2 | 1.4999 | | | 2.2998 | | | 4.6995 | | | 33.3967 | | | 33.3967 | | | 43.3957 | | |
| DY3 | 1.2992 | | | 2.6984 | | | 4.3974 | | | 34.0796 | | | 32.1807 | | | 44.3734 | | |
| DZ1 | 1.4987 | 1.2990 | 0.17 | 2.5977 | 2.6312 | 0.15 | 4.2961 | 4.5963 | 0.30 | 34.1692 | 36.1046 | 2.32 | 31.1719 | 32.2743 | 2.17 | 40.3637 | 41.7000 | 1.53 |
| DZ2 | 1.1992 | | | 2.4983 | | | 4.8966 | | | 38.6729 | | | 34.7757 | | | 41.3710 | | |
| DZ3 | 1.1990 | | | 2.7978 | | | 4.5963 | | | 35.4716 | | | 30.8753 | | | 43.3653 | | |
| EX1 | 1.8985 | 1.5323 | 0.35 | 2.8977 | 3.0980 | 0.20 | 5.6954 | 5.4630 | 0.21 | 34.1727 | 33.8773 | 1.17 | 36.5707 | 33.9105 | 2.36 | 44.3645 | 44.3706 | 3.00 |
| EX2 | 1.1994 | | | 3.2984 | | | 5.2974 | | | 32.5837 | | | 32.0840 | | | 47.3763 | | |
| EX3 | 1.4990 | | | 3.0978 | | | 5.3962 | | | 34.8756 | | | 33.0768 | | | 41.3710 | | |
| EY1 | 1.4987 | 1.3328 | 0.15 | 3.3969 | 3.5653 | 0.29 | 5.2952 | 5.6312 | 0.31 | 30.8722 | 33.8540 | 4.97 | 34.9685 | 33.2863 | 1.60 | 43.3610 | 43.0493 | 2.51 |
| EY2 | 1.1998 | | | 3.3993 | | | 5.6989 | | | 31.0938 | | | 31.7936 | | | 45.3909 | | |
| EY3 | 1.2999 | | | 3.8996 | | | 5.8994 | | | 39.5960 | | | 33.0967 | | | 40.3960 | | |
| EZ1 | 1.5000 | 1.6327 | 0.11 | 3.0000 | 3.4320 | 0.38 | 5.8000 | 5.3648 | 0.38 | 31.9000 | 32.4879 | 0.94 | 36.6000 | 33.0550 | 3.41 | 40.4000 | 40.7183 | 0.57 |
| EZ2 | 1.6988 | | | 3.6974 | | | 5.1964 | | | 33.5765 | | | 32.7771 | | | 41.3710 | | |
| EZ3 | 1.6993 | | | 3.5986 | | | 5.0980 | | | 31.9872 | | | 29.7881 | | | 40.3838 | | |

**ตารางที่ ง-10** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินหลังการปลูกข้าวของทองแดง (mg/kg)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 1.1994 | 1.1996 | 0.20 | 0.9995 | 0.7331 | 0.31 | 0.6997 | 0.7998 | 0.26 |
| RA2 | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | | 0.9999 | | | 0.7999 | | | 0.5999 | | |
| RA3 | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | | 1.3996 | | | 0.3999 | | | 1.0997 | | |
| CT1 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 5.1984 | 5.5652 | 0.32 | 41.7875 | 41.9888 | 0.82 | 45.1864 | 46.3876 | 1.11 | 19.6941 | 21.1943 | 1.55 |
| CT2 | n.d. | | | n.d. | | | 5.6989 | | | 41.2917 | | | 46.5907 | | | 21.0958 | | |
| CT3 | n.d. | | | n.d. | | | 5.7983 | | | 42.8871 | | | 47.3858 | | | 22.7932 | | |
| BX1 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 2.5984 | 2.8657 | 0.31 | 24.7851 | 28.0560 | 5.23 | 26.6840 | 27.2229 | 3.33 | 25.0849 | 27.7558 | 6.42 |
| BX2 | n.d. | | | n.d. | | | 2.7986 | | | 34.0830 | | | 30.7846 | | | 35.0825 | | |
| BX3 | n.d. | | | n.d. | | | 3.2000 | | | 25.3000 | | | 24.2000 | | | 23.1000 | | |
| BY1 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 3.1990 | 2.7658 | 0.45 | 36.1891 | 27.8242 | 7.24 | 37.2888 | 28.7239 | 7.44 | 24.9925 | 26.4245 | 1.91 |
| BY2 | n.d. | | | n.d. | | | 2.2991 | | | 23.6905 | | | 23.8904 | | | 28.5886 | | |
| BY3 | n.d. | | | n.d. | | | 2.7992 | | | 23.5929 | | | 24.9925 | | | 25.6923 | | |
| BZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 2.0994 | 2.5994 | 0.44 | 22.1933 | 24.1279 | 2.32 | 24.8925 | 23.0280 | 2.27 | 25.7923 | 23.1279 | 2.41 |
| BZ2 | n.d. | | | n.d. | | | 2.7992 | | | 23.4930 | | | 20.4939 | | | 21.0937 | | |
| BZ3 | n.d. | | | n.d. | | | 2.8997 | | | 26.6973 | | | 23.6976 | | | 22.4978 | | |
| CX1 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 2.8988 | 2.6324 | 0.38 | 26.8892 | 32.6221 | 8.42 | 24.7901 | 29.4231 | 5.99 | 23.4906 | 27.1907 | 6.67 |
| CX2 | n.d. | | | n.d. | | | 2.7994 | | | 42.2915 | | | 36.1928 | | | 34.8930 | | |
| CX3 | n.d. | | | n.d. | | | 2.1989 | | | 28.6857 | | | 27.2864 | | | 23.1884 | | |
| CY1 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 2.3993 | 2.4322 | 0.45 | 20.6938 | 22.2554 | 1.43 | 20.5938 | 23.6541 | 4.00 | 28.2915 | 26.5202 | 1.66 |
| CY2 | n.d. | | | n.d. | | | 2.8988 | | | 23.4906 | | | 22.1911 | | | 24.9900 | | |
| CY3 | n.d. | | | n.d. | | | 1.9984 | | | 22.5819 | | | 28.1775 | | | 26.2790 | | |
| CZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 2.3998 | 2.6989 | 0.44 | 27.5972 | 26.9227 | 0.99 | 22.1978 | 22.7241 | 1.57 | 26.9973 | 27.3557 | 0.63 |
| CZ2 | n.d. | | | n.d. | | | 2.4988 | | | 27.3863 | | | 21.4893 | | | 28.0860 | | |
| CZ3 | n.d. | | | n.d. | | | 3.1981 | | | 25.7845 | | | 24.4853 | | | 26.9838 | | |

หมายเหตุ n.d.=non detect

**ตารางที่ ง-10** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินหลังการปลูกข้าวของทองแดง (mg/kg) (ต่อ)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DX1 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 2.3993 | 1.9995 | 0.36 | 24.6926 | 30.9930 | 5.58 | 24.1927 | 30.2598 | 5.49 | 27.1918 | 29.1599 | 2.11 |
| DX2 | n.d. | | | n.d. | | | 1.8996 | | | 35.2929 | | | 34.8930 | | | 31.3937 | | |
| DX3 | n.d. | | | n.d. | | | 1.6997 | | | 32.9934 | | | 31.6937 | | | 28.8942 | | |
| DY1 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 1.4991 | 1.4657 | 0.15 | 35.6786 | 32.3452 | 6.03 | 38.8767 | 31.2128 | 9.94 | 35.6786 | 32.6783 | 5.54 |
| DY2 | n.d. | | | n.d. | | | 1.2991 | | | 35.9748 | | | 34.7757 | | | 36.0747 | | |
| DY3 | n.d. | | | n.d. | | | 1.5989 | | | 25.3822 | | | 19.9860 | | | 26.2816 | | |
| DZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 2.1989 | 1.8992 | 0.44 | 27.1864 | 25.4231 | 1.57 | 19.8901 | 22.9245 | 9.94 | 28.2859 | 27.6222 | 0.98 |
| DZ2 | n.d. | | | n.d. | | | 2.0990 | | | 24.1879 | | | 22.5887 | | | 28.0860 | | |
| DZ3 | n.d. | | | n.d. | | | 1.3997 | | | 24.8950 | | | 26.2947 | | | 26.4947 | | |
| EX1 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 2.6987 | 2.6321 | 0.12 | 36.1819 | 34.3502 | 2.01 | 34.5827 | 35.2834 | 0.88 | 41.4793 | 44.0465 | 2.56 |
| EX2 | n.d. | | | n.d. | | | 2.4978 | | | 34.6688 | | | 36.2674 | | | 44.0603 | | |
| EX3 | n.d. | | | n.d. | | | 2.7000 | | | 32.2000 | | | 35.0000 | | | 46.6000 | | |
| EY1 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 2.3981 | 2.5323 | 0.23 | 22.9816 | 24.4239 | 1.51 | 27.7778 | 25.2894 | 3.19 | 32.5739 | 28.8211 | 4.07 |
| EY2 | n.d. | | | n.d. | | | 2.3995 | | | 25.9948 | | | 26.3947 | | | 29.3941 | | |
| EY3 | n.d. | | | n.d. | | | 2.7994 | | | 24.2951 | | | 21.6957 | | | 24.4951 | | |
| EZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 2.6981 | 2.7983 | 0.17 | 37.8735 | 35.1120 | 2.45 | 36.9741 | 35.6783 | 1.91 | 40.6715 | 40.2090 | 0.98 |
| EZ2 | n.d. | | | n.d. | | | 2.9976 | | | 34.2726 | | | 36.5707 | | | 40.8673 | | |
| EZ3 | n.d. | | | n.d. | | | 2.6992 | | | 33.1900 | | | 33.4900 | | | 39.0883 | | |

หมายเหตุ n.d.=non detect

**ตารางที่ ง-11** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินก่อนการปลูกข้าวของสังกะสี (mg/kg)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 11.4989 | 12.4637 | 0.91 | 43.4957 | 42.1236 | 1.24 | 20.4980 | 21.2617 | 0.86 | 20.3980 | 20.6618 | 0.55 | 2.5997 | 2.0329 | 0.49 | 2.5997 | 2.4661 | 0.23 |
| RA2 | 12.5962 | | | 41.7875 | | | 22.1933 | | | 20.2939 | | | 1.7995 | | | 2.1993 | | |
| RA3 | 13.2960 | | | 41.0877 | | | 21.0937 | | | 21.2936 | | | 1.6995 | | | 2.5992 | | |
| CT1 | 32.2774 | 33.4798 | 2.34 | 97.5317 | 96.0090 | 1.42 | 43.6694 | 42.5410 | 1.09 | 53.9422 | 53.2949 | 2.86 | 11.0922 | 10.5269 | 1.25 | 16.19 | 15.49 | 0.70 |
| CT2 | 36.1747 | | | 94.7337 | | | 42.4703 | | | 50.1649 | | | 11.3920 | | | 14.79 | | |
| CT3 | 31.9872 | | | 95.7617 | | | 41.4834 | | | 55.7777 | | | 9.0964 | | | 15.49 | | |
| BX1 | 33.3866 | 33.1201 | 0.55 | 98.0608 | 98.0274 | 0.74 | 41.1835 | 43.3159 | 2.05 | 52.1791 | 52.8122 | 0.77 | 9.6961 | 10.6957 | 0.95 | 14.79 | 15.16 | 0.32 |
| BX2 | 32.4903 | | | 97.2708 | | | 43.4870 | | | 52.5842 | | | 11.5965 | | | 15.30 | | |
| BX3 | 33.4833 | | | 98.7506 | | | 45.2774 | | | 53.6732 | | | 10.7946 | | | 15.39 | | |
| BY1 | 32.6706 | 33.0425 | 0.41 | 97.7121 | 97.4951 | 1.85 | 43.0612 | 42.4688 | 0.55 | 57.6481 | 57.0914 | 0.89 | 12.7885 | 10.5921 | 1.90 | 15.8857 | 15.2221 | 0.58 |
| BY2 | 32.9802 | | | 95.5427 | | | 42.3746 | | | 56.0664 | | | 9.5942 | | | 14.9910 | | |
| BY3 | 33.4766 | | | 99.2305 | | | 41.9706 | | | 57.5597 | | | 9.3934 | | | 14.7896 | | |
| BZ1 | 32.8901 | 32.3505 | 0.50 | 98.3705 | 98.0174 | 1.31 | 42.5872 | 42.0456 | 0.55 | 55.4834 | 54.5729 | 0.92 | 10.8967 | 10.6945 | 0.91 | 14.4957 | 15.1922 | 0.88 |
| BZ2 | 32.2710 | | | 99.1108 | | | 42.0621 | | | 53.6517 | | | 11.4897 | | | 16.1854 | | |
| BZ3 | 31.8904 | | | 96.5710 | | | 41.4876 | | | 54.5836 | | | 9.6971 | | | 14.8955 | | |
| CX1 | 31.4969 | 32.4492 | 1.05 | 94.2906 | 95.6821 | 1.61 | 42.6957 | 42.8771 | 0.44 | 53.3947 | 54.0712 | 2.14 | 10.4990 | 11.2604 | 1.00 | 15.5984 | 15.0920 | 0.46 |
| CX2 | 32.2710 | | | 95.3142 | | | 42.5617 | | | 52.3529 | | | 12.3889 | | | 14.9865 | | |
| CX3 | 33.5799 | | | 97.4415 | | | 43.3740 | | | 56.4661 | | | 10.8935 | | | 14.6912 | | |
| CY1 | 35.1965 | 33.9599 | 1.16 | 96.2904 | 96.7472 | 0.71 | 43.3957 | 44.6910 | 1.15 | 55.8944 | 55.2558 | 1.37 | 11.6988 | 10.5979 | 0.95 | 14.5985 | 15.0636 | 0.50 |
| CY2 | 32.8967 | | | 96.3904 | | | 45.0955 | | | 56.1944 | | | 10.0990 | | | 14.9985 | | |
| CY3 | 33.7865 | | | 97.5610 | | | 45.5818 | | | 53.6785 | | | 9.9960 | | | 15.5938 | | |
| CZ1 | 33.0702 | 32.7125 | 0.39 | 96.5131 | 95.6060 | 0.79 | 42.7615 | 42.1729 | 1.48 | 55.1504 | 55.4319 | 1.54 | 10.5905 | 11.2597 | 0.71 | 15.4861 | 15.1903 | 0.35 |
| CZ2 | 32.2935 | | | 95.0810 | | | 40.4919 | | | 57.0886 | | | 11.9976 | | | 14.7970 | | |
| CZ3 | 32.7738 | | | 95.2238 | | | 43.2654 | | | 54.0568 | | | 11.1910 | | | 15.2878 | | |

**ตารางที่ ง-11** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินก่อนการปลูกข้าวของสังกะสี (mg/kg) (ต่อ)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DX1 | 33.0934 | 32.3892 | 0.96 | 93.9812 | 95.3013 | 2.38 | 42.0916 | 42.1526 | 0.40 | 54.6891 | 53.8488 | 0.73 | 10.6979 | 10.7630 | 0.50 | 15.6969 | 15.0950 | 0.60 |
| DX2 | 32.7836 | | | 98.0510 | | | 42.5787 | | | 53.3733 | | | 11.2944 | | | 15.0925 | | |
| DX3 | 31.2906 | | | 93.8718 | | | 41.7875 | | | 53.4840 | | | 10.2969 | | | 14.4957 | | |
| DY1 | 34.1761 | 32.9512 | 1.07 | 97.7316 | 94.8220 | 2.53 | 42.7701 | 43.4796 | 1.56 | 54.5618 | 54.2080 | 0.39 | 11.8917 | 11.0613 | 0.90 | 15.5891 | 15.2594 | 0.57 |
| DY2 | 32.4968 | | | 93.0907 | | | 42.3958 | | | 53.7946 | | | 10.0990 | | | 14.5985 | | |
| DY3 | 32.1807 | | | 93.6438 | | | 45.2728 | | | 54.2674 | | | 11.1933 | | | 15.5906 | | |
| DZ1 | 33.1701 | 32.4407 | 0.70 | 93.4159 | 94.4246 | 2.94 | 43.2611 | 43.6318 | 1.20 | 54.8506 | 54.6229 | 0.87 | 10.1908 | 10.3251 | 0.71 | 15.2862 | 15.5875 | 0.36 |
| DZ2 | 31.7778 | | | 97.7316 | | | 44.9685 | | | 53.6624 | | | 9.6932 | | | 15.4892 | | |
| DZ3 | 32.3741 | | | 92.1263 | | | 42.6659 | | | 55.3557 | | | 11.0911 | | | 15.9872 | | |
| EX1 | 31.8745 | 32.1786 | 0.44 | 94.5244 | 93.8373 | 0.95 | 43.5651 | 43.6708 | 1.35 | 53.5572 | 54.2639 | 0.61 | 10.9912 | 10.7594 | 0.49 | 14.7882 | 15.3897 | 0.72 |
| EX2 | 32.6837 | | | 92.7536 | | | 42.3788 | | | 54.6727 | | | 10.1949 | | | 15.1924 | | |
| EX3 | 31.9776 | | | 94.2340 | | | 45.0685 | | | 54.5618 | | | 11.0922 | | | 16.1887 | | |
| EY1 | 32.4708 | 32.4204 | 0.40 | 96.0136 | 95.9283 | 0.51 | 42.9613 | 43.8160 | 0.92 | 54.8506 | 54.3448 | 1.56 | 10.0909 | 10.9958 | 0.82 | 16.2853 | 15.0270 | 1.11 |
| EY2 | 31.9936 | | | 95.3809 | | | 44.7910 | | | 55.5889 | | | 11.1978 | | | 14.5971 | | |
| EY3 | 32.7967 | | | 96.3904 | | | 43.6956 | | | 52.5947 | | | 11.6988 | | | 14.1986 | | |
| EZ1 | 32.6000 | 32.2215 | 0.91 | 95.7000 | 94.1658 | 1.58 | 43.5000 | 43.2508 | 0.58 | 52.4000 | 53.3470 | 0.86 | 11.4000 | 10.5297 | 0.81 | 14.8000 | 15.0944 | 0.60 |
| EZ2 | 32.8770 | | | 92.5352 | | | 43.6694 | | | 53.5625 | | | 9.7931 | | | 15.7889 | | |
| EZ3 | 31.1875 | | | 94.2623 | | | 42.5830 | | | 54.0784 | | | 10.3958 | | | 14.6941 | | |

**ตารางที่ ง-12** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินหลังการปลูกข้าวของสังกะสี (mg/kg)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 1.9990 | 2.4993 | 0.44 | 8.3958 | 8.7641 | 0.47 | 16.0920 | 17.0617 | 0.85 | 4.7976 | 3.8988 | 0.79 | 4.3978 | 4.7352 | 0.574 | 2.2989 | 2.3993 | 0.10 |
| RA2 | 2.7997 | | | 8.5991 | | | 17.6982 | | | 3.5996 | | | 4.4096 | | | 2.4998 | | |
| RA3 | 2.6992 | | | 9.2972 | | | 17.3948 | | | 3.2990 | | | 5.3984 | | | 2.3993 | | |
| CT1 | 31.7905 | 31.6915 | 0.10 | 87.7737 | 87.5433 | 0.32 | 41.3876 | 41.6556 | 0.74 | 53.4840 | 52.9858 | 0.62 | 11.8964 | 13.5298 | 1.704 | 14.8955 | 14.6961 | 0.20 |
| CT2 | 31.5937 | | | 87.1826 | | | 42.4915 | | | 52.2895 | | | 15.2969 | | | 14.4971 | | |
| CT3 | 31.6905 | | | 87.6737 | | | 41.0877 | | | 53.1840 | | | 13.3960 | | | 14.6956 | | |
| BX1 | 1.8989 | 3.0987 | 1.99 | 2.9982 | 4.2983 | 1.91 | 5.5966 | 6.4975 | 1.31 | 73.3560 | 82.6689 | 14.07 | 16.3902 | 21.2248 | 8.714 | 34.2794 | 36.7861 | 4.67 |
| BX2 | 5.3973 | | | 6.4968 | | | 7.9960 | | | 98.8506 | | | 31.2844 | | | 42.1789 | | |
| BX3 | 2.0000 | | | 3.4000 | | | 5.9000 | | | 75.8000 | | | 16.0000 | | | 33.9000 | | |
| BY1 | 5.7983 | 3.2989 | 2.17 | 6.4981 | 4.4319 | 1.79 | 8.1975 | 6.3979 | 1.57 | 97.1708 | 83.2059 | 12.11 | 29.8910 | 20.9931 | 7.714 | 43.7869 | 39.9201 | 3.35 |
| BY2 | 2.1991 | | | 3.2987 | | | 5.6977 | | | 75.5698 | | | 16.8932 | | | 38.1847 | | |
| BY3 | 1.8994 | | | 3.4990 | | | 5.2984 | | | 76.8769 | | | 16.1951 | | | 37.7887 | | |
| BZ1 | 2.4993 | 2.3328 | 0.15 | 3.5989 | 3.5325 | 0.12 | 6.1981 | 5.8986 | 0.26 | 77.4768 | 76.5822 | 1.39 | 15.7953 | 16.1962 | 0.458 | 32.4903 | 34.2254 | 1.53 |
| BZ2 | 2.1993 | | | 3.3990 | | | 5.7983 | | | 74.9775 | | | 16.6950 | | | 35.3894 | | |
| BZ3 | 2.2998 | | | 3.5996 | | | 5.6994 | | | 77.2923 | | | 16.0984 | | | 34.7965 | | |
| CX1 | 2.2991 | 3.1990 | 1.82 | 3.1987 | 4.2320 | 1.88 | 5.6977 | 6.9976 | 2.08 | 75.4698 | 82.6709 | 12.74 | 16.3934 | 21.8595 | 8.785 | 38.6845 | 39.6858 | 3.13 |
| CX2 | 5.2989 | | | 6.3987 | | | 9.3981 | | | 97.3805 | | | 31.9936 | | | 43.1914 | | |
| CX3 | 1.9990 | | | 3.0985 | | | 5.8971 | | | 75.1624 | | | 17.1914 | | | 37.1814 | | |
| CY1 | 2.5992 | 2.5988 | 0.40 | 3.6989 | 3.4316 | 0.38 | 5.1984 | 5.4306 | 0.25 | 76.2771 | 76.5283 | 0.72 | 17.0949 | 16.8249 | 0.46 | 32.8901 | 33.8831 | 1.18 |
| CY2 | 2.9988 | | | 2.9988 | | | 5.6977 | | | 75.9696 | | | 16.2935 | | | 35.1859 | | |
| CY3 | 2.1982 | | | 3.5971 | | | 5.3957 | | | 77.3381 | | | 17.0863 | | | 33.5731 | | |
| CZ1 | 2.5997 | 2.3658 | 0.21 | 2.9997 | 3.2320 | 0.59 | 5.4995 | 5.5311 | 0.25 | 76.2924 | 76.5027 | 1.37 | 15.9984 | 16.1602 | 0.205 | 32.2968 | 33.3532 | 1.22 |
| CZ2 | 2.1989 | | | 2.7986 | | | 5.2974 | | | 77.9610 | | | 16.0920 | | | 34.6827 | | |
| CZ3 | 2.2986 | | | 3.8977 | | | 5.7965 | | | 75.2548 | | | 16.3902 | | | 33.0802 | | |

**ตารางที่ ง-12** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินหลังการปลูกข้าวของสังกะสี (mg/kg) (ต่อ)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DX1 | 2.0994 | 4.4990 | 2.08 | 3.1990 | 5.2322 | 1.76 | 5.1984 | 7.9982 | 2.43 | 76.1771 | 90.7127 | 12.60 | 17.3948 | 25.8276 | 7.305 | 32.2903 | 38.8911 | 5.74 |
| DX2 | 5.5989 | | | 6.2987 | | | 9.2981 | | | 98.5803 | | | 30.1940 | | | 42.6915 | | |
| DX3 | 5.7988 | | | 6.1988 | | | 9.4981 | | | 97.3805 | | | 29.8940 | | | 41.6917 | | |
| DY1 | 5.0969 | 4.2639 | 1.62 | 6.1963 | 5.1633 | 1.96 | 8.8947 | 7.7282 | 2.19 | 97.3416 | 91.1394 | 11.70 | 28.7827 | 25.2166 | 6.878 | 43.5739 | 41.6390 | 5.00 |
| DY2 | 5.2963 | | | 6.3955 | | | 9.0936 | | | 98.4311 | | | 29.5793 | | | 42.6701 | | |
| DY3 | 2.3983 | | | 2.8980 | | | 5.1964 | | | 77.6456 | | | 17.2879 | | | 38.6729 | | |
| DZ1 | 2.2989 | 3.4322 | 1.88 | 3.1984 | 4.0319 | 1.53 | 5.2974 | 6.5976 | 2.43 | 74.6627 | 83.9012 | 12.62 | 17.2914 | 22.4921 | 9.182 | 35.7821 | 39.2518 | 7.53 |
| DZ2 | 2.3988 | | | 3.0985 | | | 5.0975 | | | 78.7606 | | | 17.0915 | | | 34.0830 | | |
| DZ3 | 5.5989 | | | 5.7988 | | | 9.3981 | | | 98.2803 | | | 33.0934 | | | 47.8904 | | |
| EX1 | 5.7971 | 5.4307 | 0.35 | 6.1969 | 6.4304 | 0.25 | 8.9955 | 9.3290 | 0.31 | 106.9465 | 106.3502 | 0.69 | 38.6807 | 39.2150 | 0.497 | 44.8776 | 46.5115 | 1.48 |
| EX2 | 5.3951 | | | 6.3942 | | | 9.3915 | | | 106.5041 | | | 39.6643 | | | 47.7570 | | |
| EX3 | 5.1000 | | | 6.7000 | | | 9.6000 | | | 105.6000 | | | 39.3000 | | | 46.9000 | | |
| EY1 | 2.6978 | 2.4656 | 0.21 | 2.9976 | 3.3321 | 0.31 | 5.3957 | 5.5978 | 0.20 | 72.2422 | 73.3709 | 1.01 | 16.4868 | 16.7600 | 0.31 | 21.8825 | 23.3243 | 1.26 |
| EY2 | 2.2995 | | | 3.5993 | | | 5.5989 | | | 74.1852 | | | 16.6967 | | | 24.1952 | | |
| EY3 | 2.3995 | | | 3.3993 | | | 5.7988 | | | 73.6853 | | | 17.0966 | | | 23.8952 | | |
| EZ1 | 5.2963 | 5.4301 | 0.23 | 5.9958 | 6.3629 | 0.47 | 9.6932 | 9.5276 | 0.15 | 105.1264 | 105.6031 | 1.43 | 39.3724 | 39.7095 | 0.312 | 43.5695 | 44.4400 | 0.81 |
| EZ2 | 5.2958 | | | 6.1950 | | | 9.3925 | | | 107.2142 | | | 39.7682 | | | 45.1639 | | |
| EZ3 | 5.6983 | | | 6.8979 | | | 9.4972 | | | 104.4687 | | | 39.9880 | | | 44.5866 | | |

**ตารางที่ ง-13** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินก่อนการปลูกข้าวของตะกั่ว (mg/kg)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | n.d. | n.d. | n.d. | 16.8983 | 16.4962 | 0.348 | 3.5996 | 3.3659 | 0.21 | 11.2989 | 11.2640 | 0.35 | 2.1998 | 2.2661 | 0.21 | 0.9999 | 1.3330 | 0.47 |
| RA2 | n.d. | | | 16.2951 | | | 3.1990 | | | 11.5965 | | | 2.4993 | | | 1.9994 | | |
| RA3 | n.d. | | | 16.2951 | | | 3.2990 | | | 10.8967 | | | 2.0994 | | | 0.9997 | | |
| CT1 | n.d. | n.d. | n.d. | 75.7470 | 75.9211 | 0.221 | 9.6932 | 9.3611 | 0.35 | 66.7533 | 66.2936 | 0.50 | 7.9944 | 7.7953 | 0.62 | 20.9853 | 22.9864 | 1.63 |
| CT2 | n.d. | | | 75.8469 | | | 8.9937 | | | 65.7540 | | | 8.2942 | | | 22.9839 | | |
| CT3 | n.d. | | | 76.1695 | | | 9.3962 | | | 66.3735 | | | 7.0972 | | | 24.9900 | | |
| BX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 76.2695 | 76.0363 | 0.593 | 10.9956 | 11.1622 | 0.15 | 67.8729 | 68.0061 | 0.22 | 9.3962 | 9.5295 | 0.32 | 25.9896 | 26.6560 | 0.47 |
| BX2 | n.d. | | | 76.4771 | | | 11.2966 | | | 67.8796 | | | 9.2972 | | | 26.9919 | | |
| BX3 | n.d. | | | 75.3623 | | | 11.1944 | | | 68.2659 | | | 9.8951 | | | 26.9865 | | |
| BY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 72.2350 | 73.2797 | 1.009 | 11.2898 | 11.2584 | 0.25 | 65.3412 | 65.4520 | 0.27 | 9.9910 | 9.9594 | 0.06 | 27.9748 | 27.3133 | 1.70 |
| BY2 | n.d. | | | 73.3560 | | | 10.9934 | | | 65.7605 | | | 9.9940 | | | 28.9826 | | |
| BY3 | n.d. | | | 74.2480 | | | 11.4920 | | | 65.2543 | | | 9.8931 | | | 24.9825 | | |
| BZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 72.7782 | 72.6637 | 0.103 | 11.4966 | 11.1611 | 0.31 | 67.2798 | 67.8659 | 0.77 | 9.9970 | 9.8951 | 0.27 | 26.9919 | 26.6531 | 1.24 |
| BZ2 | n.d. | | | 72.6346 | | | 10.8902 | | | 68.7381 | | | 9.5914 | | | 27.9748 | | |
| BZ3 | n.d. | | | 72.5782 | | | 11.0967 | | | 67.5797 | | | 10.0970 | | | 24.9925 | | |
| CX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 74.0926 | 73.5608 | 0.709 | 10.2990 | 10.2612 | 0.06 | 65.3935 | 65.0986 | 0.39 | 9.5990 | 9.7281 | 0.32 | 22.9977 | 22.6547 | 0.48 |
| CX2 | n.d. | | | 73.8335 | | | 10.2907 | | | 65.2413 | | | 9.4915 | | | 21.9802 | | |
| CX3 | n.d. | | | 72.7563 | | | 10.1939 | | | 64.6612 | | | 10.0939 | | | 22.9862 | | |
| CY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 72.8927 | 73.3520 | 0.44 | 11.0989 | 10.9978 | 0.17 | 65.4935 | 65.7536 | 0.65 | 9.9990 | 9.5315 | 28.59 | 23.9976 | 24.3285 | 0.47 |
| CY2 | n.d. | | | 73.3927 | | | 10.7989 | | | 66.4934 | | | 9.3991 | | | 24.9975 | | |
| CY3 | n.d. | | | 73.7705 | | | 11.0956 | | | 65.2739 | | | 9.1963 | | | 23.9904 | | |
| CZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 73.5338 | 74.1864 | 0.579 | 10.8902 | 10.7599 | 0.15 | 65.8407 | 65.6585 | 0.45 | 9.7912 | 9.9604 | 0.16 | 23.9784 | 25.3173 | 1.25 |
| CZ2 | n.d. | | | 74.3851 | | | 10.7978 | | | 65.9868 | | | 10.0980 | | | 24.9950 | | |
| CZ3 | n.d. | | | 74.6403 | | | 10.5915 | | | 65.1479 | | | 9.9920 | | | 26.9784 | | |

หมายเหตุ n.d.=non detect

**ตารางที่ ง-13** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินก่อนการปลูกข้าวของตะกั่ว (mg/kg) (ต่อ)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 75.0850 | 74.7751 | 0.362 | 10.9978 | 11.1296 | 0.15 | 67.5865 | 67.4775 | 0.10 | 12.8974 | 12.5958 | 0.30 | 28.9942 | 26.3247 | 1.89 |
| DX2 | n.d. | | | 74.8626 | | | 11.0945 | | | 67.4663 | | | 12.5937 | | | 24.9875 | | |
| DX3 | n.d. | | | 74.3777 | | | 11.2966 | | | 67.3798 | | | 12.2963 | | | 24.9925 | | |
| DY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 74.2480 | 74.5652 | 0.304 | 11.0922 | 11.2281 | 0.16 | 67.3529 | 67.2353 | 0.33 | 12.6911 | 12.5609 | 0.15 | 26.9811 | 27.3204 | 1.24 |
| DY2 | n.d. | | | 74.5925 | | | 11.3989 | | | 67.4933 | | | 13.0987 | | | 25.9974 | | |
| DY3 | n.d. | | | 74.8551 | | | 11.1933 | | | 66.8599 | | | 11.8929 | | | 28.9826 | | |
| DZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 74.7327 | 74.7735 | 0.158 | 10.8902 | 11.2577 | 0.32 | 66.7399 | 67.2129 | 0.51 | 12.3889 | 12.5233 | 0.15 | 30.9721 | 30.6421 | 1.24 |
| DZ2 | n.d. | | | 74.9475 | | | 11.3920 | | | 67.1530 | | | 12.6911 | | | 28.9797 | | |
| DZ3 | n.d. | | | 74.6403 | | | 11.4908 | | | 67.7458 | | | 12.4900 | | | 31.9744 | | |
| EX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 76.6387 | 76.4157 | 0.496 | 11.1910 | 11.6256 | 0.40 | 75.3397 | 75.7162 | 0.42 | 12.6898 | 12.6582 | 0.15 | 30.9752 | 29.6467 | 1.24 |
| EX2 | n.d. | | | 76.7616 | | | 11.6942 | | | 76.1619 | | | 12.4938 | | | 27.9860 | | |
| EX3 | n.d. | | | 75.8469 | | | 11.9916 | | | 75.6470 | | | 12.7910 | | | 29.9790 | | |
| EY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 76.1315 | 76.4695 | 0.387 | 11.9892 | 12.0285 | 0.25 | 76.4312 | 77.3026 | 0.77 | 12.4888 | 12.5950 | 0.27 | 28.9739 | 30.6548 | 1.26 |
| EY2 | n.d. | | | 76.3847 | | | 11.7976 | | | 77.5845 | | | 12.3975 | | | 31.9936 | | |
| EY3 | n.d. | | | 76.8923 | | | 12.2988 | | | 77.8922 | | | 12.8987 | | | 30.9969 | | |
| EZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 77.1000 | 76.9052 | 0.18 | 12.8000 | 12.3622 | 0.41 | 79.5000 | 79.6708 | 0.19 | 13.0000 | 12.9286 | 0.30 | 30.0000 | 30.3223 | 1.25 |
| EZ2 | n.d. | | | 76.7463 | | | 12.2914 | | | 79.6442 | | | 13.1908 | | | 28.9797 | | |
| EZ3 | n.d. | | | 76.8693 | | | 11.9952 | | | 79.8681 | | | 12.5950 | | | 31.9872 | | |

หมายเหตุ n.d.=non detect

**ตารางที่ ง-14** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินหลังการปลูกข้าวของตะกั่ว (mg/kg)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | n.d. | n.d. | n.d. | 0.1999 | 0.1000 | 0.10 | 0.1099 | 0.1433 | 0.09 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | 0.2799 | 0.1799 | 0.14 |
| RA2 | n.d. | | | 0.1000 | | | 0.0800 | | | n.d. | | | n.d. | | | 0.0200 | | |
| RA3 | n.d. | | | 0.0000 | | | 0.2399 | | | n.d. | | | n.d. | | | 0.2399 | | |
| CT1 | n.d. | n.d. | n.d. | 76.0772 | 70.9476 | 5.53 | 8.6974 | 9.4642 | 0.68 | 66.3801 | 71.7143 | 4.65 | 7.6977 | 7.6647 | 1.35 | 23.4930 | 24.3935 | 0.78 |
| CT2 | n.d. | | | 65.0870 | | | 9.6981 | | | 74.8850 | | | 8.9982 | | | 24.7950 | | |
| CT3 | n.d. | | | 71.6785 | | | 9.9970 | | | 73.8778 | | | 6.2981 | | | 24.8925 | | |
| BX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 0.0899 | 0.8662 | 0.01 | 1.0394 | 2.0591 | 0.05 | 100.5397 | 110.0584 | 0.18 | 15.0909 | 19.2590 | 0.42 | 26.8839 | 28.7558 | 0.41 |
| BX2 | n.d. | | | 2.3988 | | | 4.0280 | | | 128.8356 | | | 28.1859 | | | 33.0835 | | |
| BX3 | n.d. | | | 0.1100 | | | 1.1100 | | | 100.8000 | | | 14.5000 | | | 26.3000 | | |
| BY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 2.3993 | 0.8497 | 0.05 | 3.9688 | 2.0127 | 0.06 | 132.4603 | 115.9616 | 0.22 | 27.2918 | 21.0597 | 0.92 | 34.2897 | 29.9234 | 0.50 |
| BY2 | n.d. | | | 0.0400 | | | 0.9896 | | | 107.5570 | | | 18.5926 | | | 27.3890 | | |
| BY3 | n.d. | | | 0.1100 | | | 1.0797 | | | 107.8676 | | | 17.2948 | | | 28.0916 | | |
| BZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 0.4799 | 0.5199 | 0.05 | 1.0097 | 1.0697 | 0.10 | 108.3675 | 108.0081 | 0.39 | 19.0943 | 18.1957 | 0.90 | 28.1915 | 27.8936 | 1.08 |
| BZ2 | n.d. | | | 0.5098 | | | 1.1796 | | | 108.0576 | | | 18.1945 | | | 26.6920 | | |
| BZ3 | n.d. | | | 0.5699 | | | 1.0199 | | | 107.5992 | | | 17.2983 | | | 28.7971 | | |
| CX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 0.3199 | 0.8565 | 0.12 | 1.1096 | 2.0294 | 1.63 | 108.0568 | 118.9582 | 0.06 | 18.6925 | 20.3596 | 1.06 | 25.7897 | 28.6234 | 0.64 |
| CX2 | n.d. | | | 2.0996 | | | 3.9092 | | | 140.6719 | | | 25.1950 | | | 35.1930 | | |
| CX3 | n.d. | | | 0.1499 | | | 1.0695 | | | 108.1459 | | | 17.1914 | | | 24.8876 | | |
| CY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 0.1999 | 0.2032 | 0.04 | 0.9897 | 1.0461 | 0.05 | 107.9676 | 108.1792 | 0.19 | 19.7941 | 18.4578 | 2.14 | 26.8919 | 27.5862 | 0.75 |
| CY2 | n.d. | | | 0.2399 | | | 1.0996 | | | 108.2567 | | | 19.5922 | | | 28.3886 | | |
| CY3 | n.d. | | | 0.1699 | | | 1.0492 | | | 108.3133 | | | 15.9872 | | | 27.4780 | | |
| CZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 0.0400 | 0.1533 | 0.02 | 1.1099 | 1.0829 | 0.06 | 107.3893 | 107.9234 | 0.47 | 17.6982 | 16.5936 | 1.50 | 26.3974 | 26.9891 | 0.52 |
| CZ2 | n.d. | | | 0.0700 | | | 1.1194 | | | 108.2459 | | | 17.1914 | | | 27.1864 | | |
| CZ3 | n.d. | | | 0.3498 | | | 1.0194 | | | 108.1351 | | | 14.8911 | | | 27.3836 | | |

หมายเหตุ n.d.=non detect

**ตารางที่ ง-14** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินหลังการปลูกข้าวของตะกั่ว (mg/kg) (ต่อ)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 0.1500 | 1.5497 | 0.35 | 1.0397 | 3.4326 | 0.03 | 107.1678 | 122.9385 | 3.04 | 17.0949 | 24.1946 | 0.64 | 25.5923 | 33.2258 | 1.63 |
| DX2 | n.d. | | | 1.9996 | | | 4.6091 | | | 128.6743 | | | 27.2945 | | | 38.1924 | | |
| DX3 | n.d. | | | 2.4995 | | | 4.6491 | | | 132.9734 | | | 28.1944 | | | 35.8928 | | |
| DY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 1.8989 | 1.2259 | 0.14 | 4.1675 | 3.0946 | 0.08 | 134.2195 | 129.0808 | 0.56 | 25.5846 | 22.5517 | 0.92 | 35.3788 | 31.8789 | 0.50 |
| DY2 | n.d. | | | 1.6988 | | | 4.0572 | | | 135.0055 | | | 26.8812 | | | 34.6757 | | |
| DY3 | n.d. | | | 0.0799 | | | 1.0593 | | | 118.0174 | | | 15.1894 | | | 25.5821 | | |
| DZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 0.0300 | 0.7465 | 0.06 | 1.1194 | 2.0860 | 0.06 | 108.1459 | 114.5222 | 0.28 | 17.6912 | 21.5920 | 0.78 | 24.5877 | 29.5557 | 0.78 |
| DZ2 | n.d. | | | 0.1099 | | | 1.0295 | | | 107.7461 | | | 18.7906 | | | 25.6872 | | |
| DZ3 | n.d. | | | 2.0996 | | | 4.1092 | | | 127.6745 | | | 28.2943 | | | 38.3923 | | |
| EX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 1.9990 | 2.1324 | 0.15 | 3.9380 | 4.3914 | 0.48 | 131.7341 | 134.8702 | 2.84 | 31.6842 | 27.8871 | 3.36 | 39.5802 | 39.0819 | 0.57 |
| EX2 | n.d. | | | 2.0981 | | | 4.3461 | | | 137.2765 | | | 25.2773 | | | 38.4654 | | |
| EX3 | n.d. | | | 2.3000 | | | 4.8900 | | | 135.6000 | | | 26.7000 | | | 39.2000 | | |
| EY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 0.1998 | 0.1999 | 0.20 | 1.1491 | 1.7494 | 0.52 | 108.9129 | 109.1231 | 0.24 | 16.9864 | 17.4265 | 0.52 | 31.7546 | 30.6808 | 1.33 |
| EY2 | n.d. | | | 0.0000 | | | 2.0296 | | | 109.3781 | | | 17.2965 | | | 29.1942 | | |
| EY3 | n.d. | | | 0.3999 | | | 2.0696 | | | 109.0782 | | | 17.9964 | | | 31.0938 | | |
| EZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 2.3983 | 2.1987 | 0.20 | 4.6368 | 5.1036 | 0.41 | 134.8056 | 130.5550 | 3.99 | 26.8812 | 27.5167 | 3.35 | 39.2725 | 39.1765 | 0.27 |
| EZ2 | n.d. | | | 2.1982 | | | 5.3058 | | | 126.8985 | | | 28.5771 | | | 38.8689 | | |
| EZ3 | n.d. | | | 1.9994 | | | 5.3684 | | | 129.9610 | | | 27.0919 | | | 39.3882 | | |

หมายเหตุ n.d.=non detect

**ตารางที่ ง-15** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินก่อนการปลูกข้าวของแคดเมียม (mg/kg)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | n.d. | n.d. | n.d. | 2.4198 | 2.8560 | 0.40 | 0.9099 | 0.8998 | 0.06 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| RA2 | n.d. | | | 3.2090 | | | 0.9497 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| RA3 | n.d. | | | 2.9391 | | | 0.8397 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CT1 | n.d. | n.d. | n.d. | 2.6721 | 2.6497 | 0.05 | 1.0832 | 1.0920 | 0.01 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| CT2 | n.d. | | | 2.5882 | | | 1.0992 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CT3 | n.d. | | | 2.6889 | | | 1.0936 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| BX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 2.7989 | 2.5990 | 0.20 | 0.1799 | 0.2092 | 0.03 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| BX2 | n.d. | | | 2.3993 | | | 0.2099 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| BX3 | n.d. | | | 2.5987 | | | 0.2379 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| BY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 2.0082 | 2.0185 | 0.09 | 0.4996 | 0.4330 | 0.06 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| BY2 | n.d. | | | 2.1087 | | | 0.3998 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| BY3 | n.d. | | | 1.9386 | | | 0.3997 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| BZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 1.5095 | 1.6225 | 0.14 | 0.2999 | 0.3998 | 0.10 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| BZ2 | n.d. | | | 1.7784 | | | 0.4996 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| BZ3 | n.d. | | | 1.5795 | | | 0.3999 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 2.2898 | 2.2555 | 0.17 | 0.5000 | 0.6330 | 0.15 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| CX2 | n.d. | | | 2.4078 | | | 0.5995 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CX3 | n.d. | | | 2.0688 | | | 0.7995 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 2.0398 | 1.8863 | 0.14 | 0.5000 | 0.5332 | 0.15 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| CY2 | n.d. | | | 1.8398 | | | 0.6999 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CY3 | n.d. | | | 1.7793 | | | 0.3998 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 2.3379 | 2.0687 | 0.26 | 0.5995 | 0.6329 | 0.06 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| CZ2 | n.d. | | | 2.0396 | | | 0.5999 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CZ3 | n.d. | | | 1.8285 | | | 0.6994 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |

หมายเหตุ n.d.=non detect

**ตารางที่ ง-15** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินก่อนการปลูกข้าวของแคดเมียม (mg/kg) (ต่อ)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 1.6497 | 1.6321 | 0.07 | 0.4999 | 0.2999 | 0.20 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| DX2 | n.d. | | | 1.6932 | | | 0.2999 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| DX3 | n.d. | | | 1.5535 | | | 0.1000 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| DY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 2.2394 | 2.1877 | 0.16 | 0.0000 | 0.1666 | 0.21 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| DY2 | n.d. | | | 2.3138 | | | 0.4000 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| DY3 | n.d. | | | 2.0098 | | | 0.0999 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| DZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 1.9433 | 2.1410 | 0.19 | 0.2997 | 0.2998 | 0.10 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| DZ2 | n.d. | | | 2.3104 | | | 0.3997 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| DZ3 | n.d. | | | 2.1693 | | | 0.1998 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| EX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 1.7396 | 1.6363 | 0.11 | 0.0999 | 0.2332 | 0.15 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| EX2 | n.d. | | | 1.6533 | | | 0.1999 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| EX3 | n.d. | | | 1.5159 | | | 0.3997 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| EY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 1.7694 | 1.7020 | 0.23 | 0.3996 | 0.3998 | 0.10 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| EY2 | n.d. | | | 1.8896 | | | 0.4999 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| EY3 | n.d. | | | 1.4469 | | | 0.3000 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| EZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 1.5400 | 1.3937 | 0.13 | 0.6000 | 0.4665 | 0.23 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| EZ2 | n.d. | | | 1.3441 | | | 0.1999 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| EZ3 | n.d. | | | 1.2970 | | | 0.5998 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |

หมายเหตุ n.d.=non detect

**ตารางที่ ง-16** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินหลังการปลูกข้าวของแคดเมียม (mg/kg)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | n.d. | n.d. | n.d. | 0.0000 | 0.0667 | 0.06 | 0.1000 | 0.0333 | 0.06 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| RA2 | n.d. | | | 0.1000 | | | 0.0000 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| RA3 | n.d. | | | 0.1000 | | | 0.0000 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CT1 | n.d. | n.d. | n.d. | 2.6992 | 2.7659 | 0.31 | 1.3996 | 1.4996 | 0.10 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| CT2 | n.d. | | | 2.4995 | | | 1.4997 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CT3 | n.d. | | | 3.0991 | | | 1.5995 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| BX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 3.1981 | 2.5657 | 0.57 | 0.2998 | 0.3666 | 0.31 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| BX2 | n.d. | | | 2.0990 | | | 0.1000 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| BX3 | n.d. | | | 2.4000 | | | 0.7000 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| BY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 4.0988 | 3.4322 | 0.59 | 0.8997 | 0.7331 | 0.57 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| BY2 | n.d. | | | 3.1987 | | | 1.1995 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| BY3 | n.d. | | | 2.9991 | | | 0.1000 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| BZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 3.3990 | 2.9660 | 0.38 | 0.6998 | 0.3999 | 0.30 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| BZ2 | n.d. | | | 2.7992 | | | 0.1000 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| BZ3 | n.d. | | | 2.6997 | | | 0.4000 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 3.3986 | 3.6987 | 0.36 | 1.0996 | 0.6665 | 0.51 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| CX2 | n.d. | | | 4.0992 | | | 0.7998 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CX3 | n.d. | | | 3.5982 | | | 0.1000 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 3.3990 | 3.1651 | 0.21 | 0.0000 | 0.3665 | 0.35 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| CY2 | n.d. | | | 3.0988 | | | 0.6997 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CY3 | n.d. | | | 2.9976 | | | 0.3997 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 1.7998 | 2.2990 | 0.70 | 0.5000 | 0.7996 | 0.36 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| CZ2 | n.d. | | | 1.9990 | | | 1.1994 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| CZ3 | n.d. | | | 3.0981 | | | 0.6996 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |

หมายเหตุ n.d.=non detect

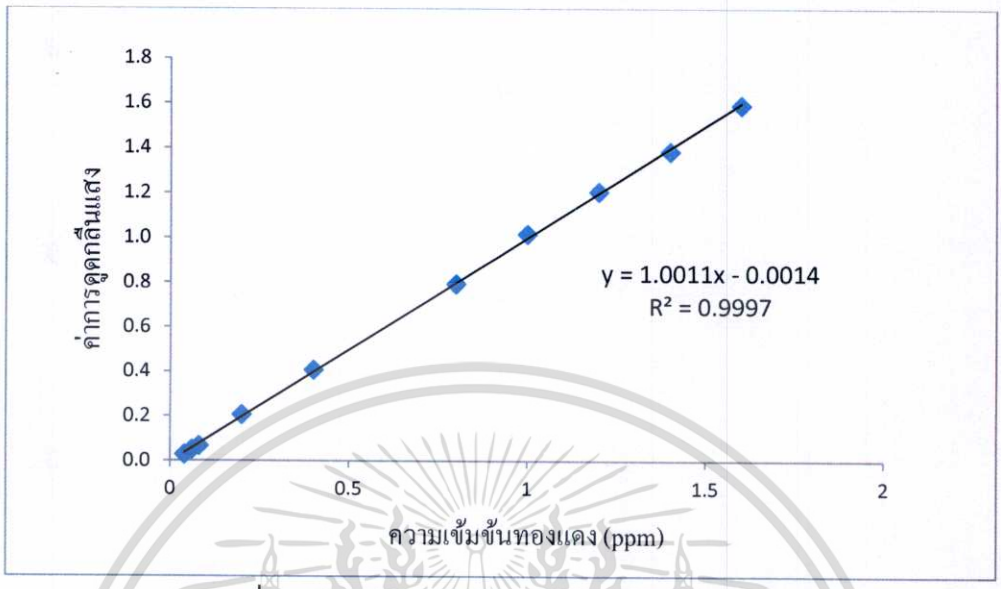
**ตารางที่ ง-16** ผลการสกัดลำดับขั้นในดินหลังการปลูกข้าวของแคดเมียม (mg/kg) (ต่อ)

| ตัวอย่าง | F1 | เฉลี่ย | SD | F2 | เฉลี่ย | SD | F3 | เฉลี่ย | SD | F4 | เฉลี่ย | SD | F5 | เฉลี่ย | SD | F6 | เฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 2.3993 | 2.6994 | 0.61 | 0.9997 | 0.5665 | 0.38 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| DX2 | n.d. | | | 2.2995 | | | 0.3999 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| DX3 | n.d. | | | 3.3993 | | | 0.2999 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| DY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 2.0987 | 2.3318 | 0.21 | 0.0999 | 0.2998 | 0.17 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| DY2 | n.d. | | | 2.4983 | | | 0.3997 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| DY3 | n.d. | | | 2.3983 | | | 0.3997 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| DZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 2.6987 | 2.9322 | 0.59 | 0.1999 | 0.4665 | 0.38 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| DZ2 | n.d. | | | 2.4988 | | | 0.2999 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| DZ3 | n.d. | | | 3.5993 | | | 0.8998 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| EX1 | n.d. | n.d. | n.d. | 3.8981 | 3.6316 | 0.25 | 0.3998 | 0.4331 | 0.06 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| EX2 | n.d. | | | 3.5968 | | | 0.4996 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| EX3 | n.d. | | | 3.4000 | | | 0.4000 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| EY1 | n.d. | n.d. | n.d. | 2.0983 | 1.8992 | 0.20 | 1.0991 | 0.9663 | 0.12 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| EY2 | n.d. | | | 1.8996 | | | 0.8998 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| EY3 | n.d. | | | 1.6997 | | | 0.8998 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| EZ1 | n.d. | n.d. | n.d. | 3.3976 | 3.4313 | 0.15 | 1.0992 | 1.2659 | 0.29 | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. |
| EZ2 | n.d. | | | 3.2974 | | | 1.5987 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |
| EZ3 | n.d. | | | 3.5989 | | | 1.0997 | | | n.d. | | | n.d. | | | n.d. | | |

หมายเหตุ n.d.=non detect

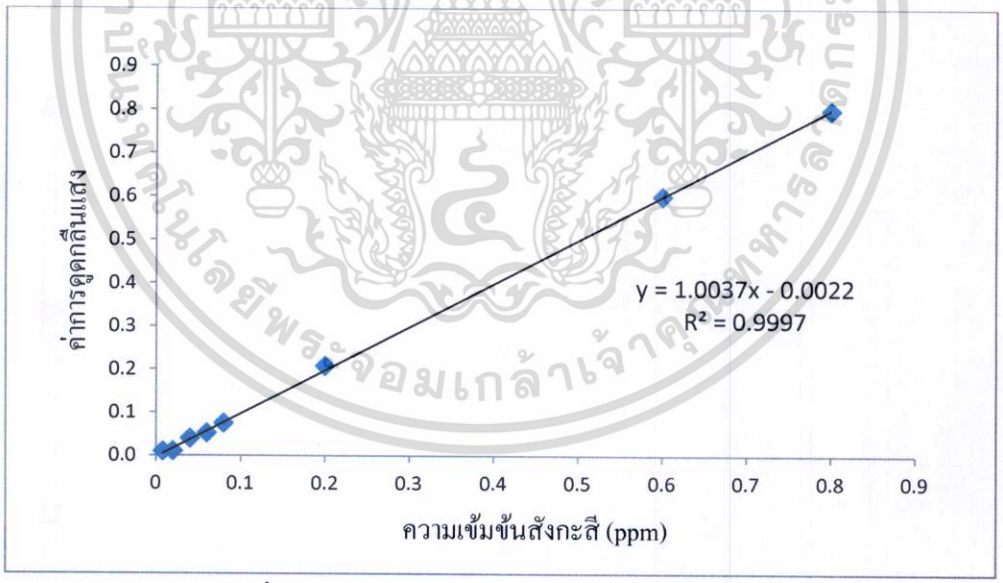
**ตัวอย่างกราฟมาตรฐานโลหะหนักในดินและพืช**

**ทองแดง**




**รูปที่ ง-1** กราฟมาตรฐานของทองแดงของดินและพืช

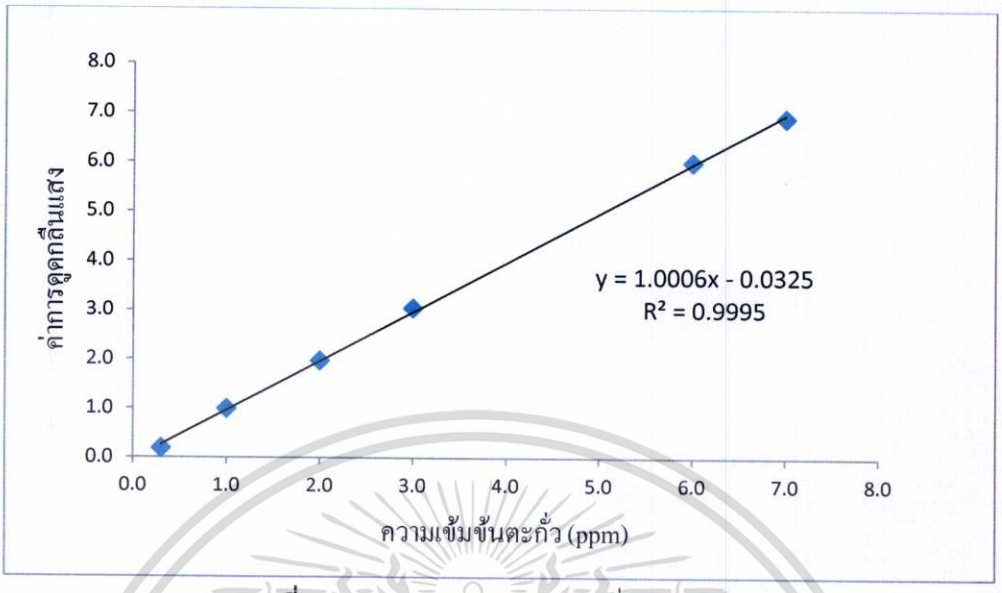
**สังกะสี**




**รูปที่ ง-2** กราฟมาตรฐานของสังกะสีของดินและพืช

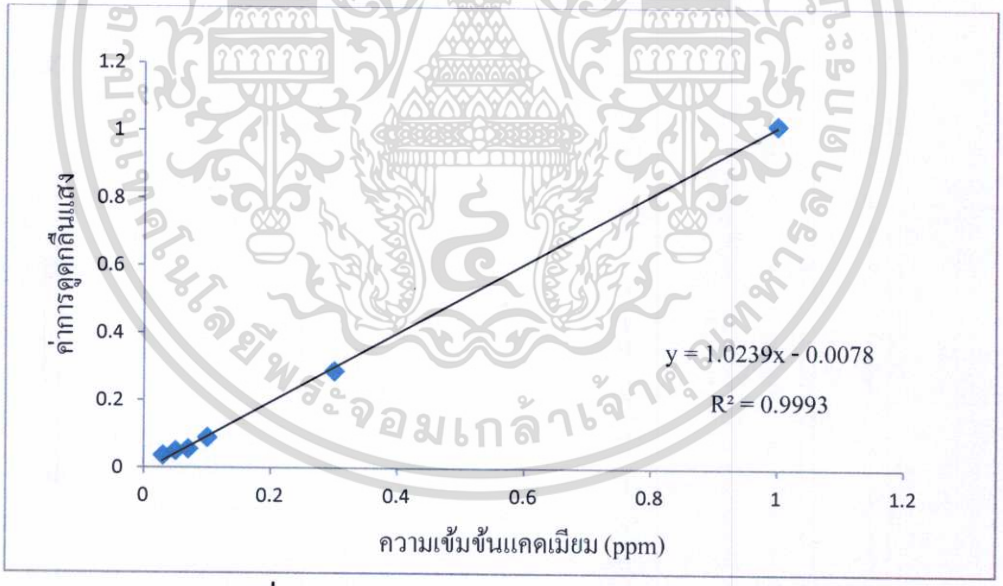
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตะกั่ว**




**รูปที่ ง-3** กราฟมาตรฐานของตะกั่วดินและพืช

**แคดเมียม**




**รูปที่ ง-4** กราฟมาตรฐานของแคดเมียมดินและพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก จ
# การวิเคราะห์ข้อมูลปัจจัยการสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation factor, BAF) และการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก (Translocation factor, TF)

**ตารางที่ จ-1** BAF ทองแดง

| ตัวอย่าง | PLANTS | SOIL | BAF | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 15.5953 | 4.4682 | 3.4903 | 4.16 | 1.15 |
| RA2 | 15.1909 | 2.7686 | 5.4868 | | |
| RA3 | 16.4000 | 4.6700 | 3.5118 | | |
| CT1 | NG | 100.5097 | - | - | - |
| CT2 | NG | 145.5263 | - | | |
| CT3 | NG | 115.5007 | - | | |
| BX1 | 41.2752 | 80.2620 | 0.5143 | 0.57 | 0.08 |
| BX2 | NG | 79.8381 | - | | |
| BX3 | 43.8693 | 70.2700 | 0.6243 | | |
| BY1 | NG | 72.3700 | - | 0.56 | 0.07 |
| BY2 | 38.1885 | 62.7637 | 0.6084 | | |
| BY3 | 41.7833 | 81.7618 | 0.5110 | | |
| BZ1 | 34.8826 | 86.6094 | 0.4028 | 0.39 | 0.05 |
| BZ2 | 33.2933 | 101.5395 | 0.3279 | | |
| BZ3 | 34.7826 | 81.5618 | 0.4265 | | |
| CX1 | 45.7771 | 70.7558 | 0.6470 | 0.57 | 0.10 |
| CX2 | NG | 71.3557 | - | | |
| CX3 | 37.3000 | 74.7252 | 0.4992 | | |
| CY1 | 35.3929 | 84.0112 | 0.4213 | 0.52 | 0.09 |
| CY2 | 36.4000 | 66.3368 | 0.5487 | | |
| CY3 | 38.0886 | 64.2636 | 0.5927 | | |
| CZ1 | 31.8713 | 67.4700 | 0.4724 | 0.43 | 0.06 |
| CZ2 | 30.4909 | 67.9428 | 0.4488 | | |
| CZ3 | 33.5731 | 92.6515 | 0.3624 | | |
| DX1 | 40.9836 | 86.3268 | 0.4747 | 0.47 | 0.00 |
| DX2 | NG | 85.3273 | - | | |
| DX3 | NG | 74.6401 | - | | |
| DY1 | NG | 96.0412 | - | 0.45 | 0.00 |
| DY2 | NG | 56.3362 | - | | |
| DY3 | 39.9760 | 88.9344 | 0.4495 | | |
| DZ1 | 39.3921 | 81.4130 | 0.4839 | 0.46 | 0.03 |
| DZ2 | 36.1855 | 81.3700 | 0.4447 | | |
| DZ3 | NG | 82.6535 | - | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ จ-1** BAF ทองแดง (ต่อ)

| ตัวอย่าง | PLANTS | SOIL | BAF | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| EX1 | NG | 133.5700 | - | - | - |
| EX2 | NG | 94.7132 | - | | |
| EX3 | NG | 139.4724 | - | | |
| EY1 | 38.8922 | 68.6494 | 0.5665 | 0.60 | 0.03 |
| EY2 | 36.6000 | 58.3175 | 0.6276 | | |
| EY3 | 36.9000 | 60.0520 | 0.6145 | | |
| EZ1 | NG | 130.5439 | - | - | - |
| EZ2 | NG | 109.5043 | - | | |
| EZ3 | NG | 95.3937 | - | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ จ-2** BAF สังกะสี

| ตัวอย่าง | PLANTS | SOIL | BAF | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 64.2807 | 38.8844 | 1.6531 | 1.56 | 0.08 |
| RA2 | 57.5655 | 37.1814 | 1.5482 | | |
| RA3 | 53.4000 | 35.8000 | 1.4916 | | |
| CT1 | NG | 243.2540 | - | - | - |
| CT2 | NG | 249.3252 | - | | |
| CT3 | NG | 254.2475 | - | | |
| BX1 | 110.2339 | 141.3859 | 0.7797 | 0.75 | 0.04 |
| BX2 | NG | 189.3243 | - | | |
| BX3 | 99.1306 | 138.4000 | 0.7163 | | |
| BY1 | NG | 187.4000 | - | 0.68 | 0.05 |
| BY2 | 94.6716 | 131.3869 | 0.7206 | | |
| BY3 | 82.8669 | 128.3872 | 0.6454 | | |
| BZ1 | 91.1544 | 134.3060 | 0.6787 | 0.71 | 0.03 |
| BZ2 | 96.0808 | 131.3606 | 0.7314 | | |
| BZ3 | 91.9540 | 127.3873 | 0.7218 | | |
| CX1 | 109.7451 | 123.3753 | 0.8895 | 0.84 | 0.08 |
| CX2 | NG | 189.3621 | - | | |
| CX3 | 95.5000 | 122.3266 | 0.7807 | | |
| CY1 | 104.8790 | 127.3109 | 0.8238 | 0.82 | 0.04 |
| CY2 | 106.0000 | 123.3383 | 0.8594 | | |
| CY3 | 93.7719 | 121.3879 | 0.7725 | | |
| CZ1 | 109.4015 | 124.4000 | 0.8794 | 0.76 | 0.11 |
| CZ2 | 86.9739 | 128.3487 | 0.6776 | | |
| CZ3 | 95.2238 | 132.3735 | 0.7194 | | |
| DX1 | 106.7573 | 146.3268 | 0.7296 | 0.73 | 0.00 |
| DX2 | NG | 189.3053 | - | | |
| DX3 | NG | 188.3247 | - | | |
| DY1 | NG | 191.3426 | - | 0.77 | 0.00 |
| DY2 | NG | 196.2822 | - | | |
| DY3 | 100.6396 | 131.3475 | 0.7662 | | |
| DZ1 | 89.5821 | 135.3053 | 0.6621 | 0.71 | 0.06 |
| DZ2 | 95.7617 | 127.4000 | 0.7517 | | |
| DZ3 | NG | 195.3609 | - | | |
| EX1 | NG | 240.4000 | - | - | - |
| EX2 | NG | 241.2552 | - | | |
| EX3 | NG | 246.2276 | - | | |
| EY1 | 100.6799 | 130.3609 | 0.7723 | 0.72 | 0.05 |
| EY2 | 102.5000 | 143.2711 | 0.7154 | | |
| EY3 | 90.4000 | 134.3597 | 0.6728 | | |
| EZ1 | NG | 238.3523 | - | - | - |
| EZ2 | NG | 241.2552 | - | | |
| EZ3 | NG | 235.2118 | - | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ จ-3** BAF ตะกั่ว

| ตัวอย่าง | PLANTS | SOIL | BAF | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 32.0904 | 38.8844 | 0.8253 | 0.90 | 0.07 |
| RA2 | 34.7791 | 37.1814 | 0.9354 | | |
| RA3 | 33.9000 | 35.8000 | 0.9469 | | |
| CT1 | NG | 243.2540 | - | - | - |
| CT2 | NG | 249.3252 | - | | |
| CT3 | NG | 254.2475 | - | | |
| BX1 | 114.4313 | 141.3859 | 0.8094 | 0.82 | 0.01 |
| BX2 | NG | 189.3243 | - | | |
| BX3 | 113.9203 | 138.4000 | 0.8231 | | |
| BY1 | NG | 187.4000 | - | 1.11 | 0.25 |
| BY2 | 122.4633 | 131.3869 | 0.9321 | | |
| BY3 | 164.6341 | 128.3872 | 1.2823 | | |
| BZ1 | 134.3328 | 134.3060 | 1.0002 | 1.06 | 0.09 |
| BZ2 | 133.4733 | 131.3606 | 1.0161 | | |
| BZ3 | 147.4263 | 127.3873 | 1.1573 | | |
| CX1 | 136.3518 | 123.3753 | 1.1052 | 1.11 | 0.01 |
| CX2 | NG | 189.3621 | - | | |
| CX3 | 136.7700 | 122.3266 | 1.1181 | | |
| CY1 | 156.9686 | 127.3109 | 1.2330 | 1.15 | 0.08 |
| CY2 | 141.3000 | 123.3383 | 1.1456 | | |
| CY3 | 130.7608 | 121.3879 | 1.0772 | | |
| CZ1 | 147.3674 | 124.4000 | 1.1846 | 1.15 | 0.03 |
| CZ2 | 145.7563 | 128.3487 | 1.1356 | | |
| CZ3 | 149.6803 | 132.3735 | 1.1307 | | |
| DX1 | 142.7429 | 146.3268 | 0.9755 | 0.98 | 0.00 |
| DX2 | NG | 189.3053 | - | | |
| DX3 | NG | 188.3247 | - | | |
| DY1 | NG | 191.3426 | - | 1.22 | 0.00 |
| DY2 | NG | 196.2822 | - | | |
| DY3 | 159.6042 | 131.3475 | 1.2151 | | |
| DZ1 | 134.4731 | 135.3053 | 0.9938 | 1.02 | 0.04 |
| DZ2 | 133.3467 | 127.4000 | 1.0467 | | |
| DZ3 | NG | 195.3609 | - | | |
| EX1 | NG | 240.4000 | - | - | - |
| EX2 | NG | 241.2552 | - | | |
| EX3 | NG | 246.2276 | - | | |
| EY1 | 108.4783 | 130.3609 | 0.8321 | 0.93 | 0.10 |
| EY2 | 132.7000 | 143.2711 | 0.9262 | | |
| EY3 | 138.0000 | 134.3597 | 1.0271 | | |
| EZ1 | NG | 238.3523 | - | - | - |
| EZ2 | NG | 241.2552 | - | | |
| EZ3 | NG | 235.2118 | - | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ จ-4** BAF แคดเมียม

| ตัวอย่าง | PLANTS | SOIL | BAF | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 5.3485 | 1.0996 | 4.8643 | 5.92 | 1.49 |
| RA2 | 4.8781 | 0.6997 | 6.9722 | | |
| RA3 | 6.1306 | 0.0000 | - | | |
| CT1 | NG | 4.1075 | - | - | - |
| CT2 | NG | 6.2181 | - | | |
| CT3 | NG | 4.4373 | - | | |
| BX1 | 19.9262 | 0.9999 | 19.9282 | 18.60 | 1.88 |
| BX2 | NG | 1.0996 | - | | |
| BX3 | 17.4453 | 1.0100 | 17.2725 | | |
| BY1 | NG | 1.7000 | - | 9.85 | 0.00 |
| BY2 | 18.7181 | 1.8998 | 9.8526 | | |
| BY3 | 17.3563 | 0.3000 | 57.8601 | | |
| BZ1 | 16.5989 | 0.3997 | 41.5263 | 13.64 | 0.86 |
| BZ2 | 19.9394 | 1.3996 | 14.2467 | | |
| BZ3 | 13.0236 | 0.9999 | 13.0249 | | |
| CX1 | 9.3874 | 0.8998 | 10.4325 | 11.28 | 1.20 |
| CX2 | NG | 1.8996 | - | | |
| CX3 | 12.1172 | 0.9994 | 12.1244 | | |
| CY1 | 14.1385 | 0.0999 | 141.4836 | 16.56 | 12.18 |
| CY2 | 12.5777 | 0.4998 | 25.1680 | | |
| CY3 | 11.1279 | 1.3999 | 7.9493 | | |
| CZ1 | 17.6164 | 1.2000 | 14.6803 | 12.85 | 4.13 |
| CZ2 | 15.7338 | 0.9996 | 15.7401 | | |
| CZ3 | 15.4328 | 1.8996 | 8.1241 | | |
| DX1 | 9.0150 | 0.9995 | 9.0195 | 9.02 | 0.00 |
| DX2 | NG | 1.3993 | - | | |
| DX3 | NG | 0.1000 | - | | |
| DY1 | NG | 0.3999 | - | 21.45 | 0.00 |
| DY2 | NG | 0.3998 | - | | |
| DY3 | 15.0116 | 0.6997 | 21.4537 | | |
| DZ1 | 7.8090 | 0.2998 | 26.0482 | 7.02 | 0.00 |
| DZ2 | 7.0183 | 1.0000 | 7.0183 | | |
| DZ3 | NG | 0.8998 | - | | |
| EX1 | NG | 3.6000 | - | - | - |
| EX2 | NG | 4.1975 | - | | |
| EX3 | NG | 3.9972 | - | | |
| EY1 | 8.5696 | 0.5998 | 14.2869 | 10.19 | 3.60 |
| EY2 | 9.6683 | 1.0990 | 8.7972 | | |
| EY3 | 8.9945 | 1.1996 | 7.4977 | | |
| EZ1 | NG | 3.9992 | - | - | - |
| EZ2 | NG | 3.8977 | - | | |
| EZ3 | NG | 3.7970 | - | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ จ-5** TF ทองแดง

| ตัวอย่าง | Cu ในเมล็ด+ลำต้น+ใบ | Cu ในราก | TF | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 14.2957 | 1.2996 | 5.3529 | 6.06 | 0.85 |
| RA2 | 13.2920 | 1.8989 | 5.8333 | | |
| RA3 | 15.0000 | 1.4000 | 7.0000 | | |
| CT1 | NG | NG | NG | - | - |
| CT2 | NG | NG | NG | | |
| CT3 | NG | NG | NG | | |
| BX1 | 19.1885 | 22.0867 | 0.9442 | 0.83 | 0.16 |
| BX2 | NG | NG | NG | | |
| BX3 | 19.0866 | 24.7827 | 0.7224 | | |
| BY1 | NG | NG | NG | 0.89 | 0.03 |
| BY2 | 18.2945 | 19.8940 | 0.9104 | | |
| BY3 | 19.5922 | 22.1911 | 0.8750 | | |
| BZ1 | 17.5912 | 17.2914 | 1.0056 | 1.06 | 0.14 |
| BZ2 | 17.5965 | 15.6969 | 1.2153 | | |
| BZ3 | 16.6917 | 18.0910 | 0.9540 | | |
| CX1 | 16.8916 | 28.8856 | 0.7794 | 0.70 | 0.11 |
| CX2 | NG | NG | NG | | |
| CX3 | 17.0000 | 20.3000 | 0.6250 | | |
| CY1 | 14.5971 | 20.7958 | 0.5862 | 0.63 | 0.09 |
| CY2 | 13.3000 | 23.1000 | 0.7360 | | |
| CY3 | 15.2954 | 22.7932 | 0.5741 | | |
| CZ1 | 11.3897 | 20.4816 | 0.3084 | 0.29 | 0.05 |
| CZ2 | 10.5968 | 19.8940 | 0.2331 | | |
| CZ3 | 13.2894 | 20.2838 | 0.3358 | | |
| DX1 | 15.4938 | 25.4898 | 0.7261 | 0.73 | 0.00 |
| DX2 | NG | NG | NG | | |
| DX3 | NG | NG | NG | | |
| DY1 | NG | NG | NG | 0.55 | 0.00 |
| DY2 | NG | NG | NG | | |
| DY3 | 15.0909 | 24.8851 | 0.5477 | | |
| DZ1 | 16.2967 | 23.0954 | 0.7570 | 0.64 | 0.16 |
| DZ2 | 12.8948 | 23.2907 | 0.5261 | | |
| DZ3 | NG | NG | NG | | |
| EX1 | NG | NG | NG | - | - |
| EX2 | NG | NG | NG | | |
| EX3 | NG | NG | NG | | |
| EY1 | 13.7972 | 25.0950 | 0.4880 | 0.46 | 0.11 |
| EY2 | 11.7000 | 24.9000 | 0.5551 | | |
| EY3 | 12.2000 | 24.7000 | 0.3351 | | |
| EZ1 | NG | NG | NG | - | - |
| EZ2 | NG | NG | NG | | |
| EZ3 | NG | NG | NG | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ จ-6** TF สังกะสี

| ตัวอย่าง | Zn ในเมล็ด+ลำต้น+ใบ | Zn ในราก | TF | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 55.9832 | 8.2975 | 6.7470 | 5.83 | 0.98 |
| RA2 | 49.2704 | 8.2950 | 5.9398 | | |
| RA3 | 44.2000 | 9.2000 | 4.8043 | | |
| CT1 | NG | NG | NG | - | - |
| CT2 | NG | NG | NG | | |
| CT3 | NG | NG | NG | | |
| BX1 | 31.1813 | 79.0526 | 0.3944 | 0.42 | 0.03 |
| BX2 | NG | NG | NG | | |
| BX3 | 30.0789 | 69.0517 | 0.4356 | | |
| BY1 | NG | NG | NG | 0.34 | 0.03 |
| BY2 | 22.5932 | 72.0784 | 0.3135 | | |
| BY3 | 21.7913 | 61.0756 | 0.3568 | | |
| BZ1 | 25.0875 | 66.0670 | 0.3797 | 0.35 | 0.03 |
| BZ2 | 22.9954 | 73.0854 | 0.3146 | | |
| BZ3 | 23.8881 | 68.0660 | 0.3510 | | |
| CX1 | 25.6872 | 84.0580 | 0.3056 | 0.34 | 0.05 |
| CX2 | NG | NG | NG | | |
| CX3 | 26.4000 | 69.1000 | 0.3821 | | |
| CY1 | 29.7940 | 75.0850 | 0.3968 | 0.38 | 0.02 |
| CY2 | 28.9000 | 77.1000 | 0.3748 | | |
| CY3 | 24.6926 | 69.0793 | 0.3575 | | |
| CZ1 | 21.3808 | 88.0208 | 0.2429 | 0.30 | 0.06 |
| CZ2 | 22.8931 | 64.0808 | 0.3573 | | |
| CZ3 | 21.1831 | 74.0408 | 0.2861 | | |
| DX1 | 23.6905 | 73.0708 | 0.3242 | 0.32 | 0.00 |
| DX2 | NG | NG | NG | | |
| DX3 | NG | NG | NG | | |
| DY1 | NG | NG | NG | 0.52 | 0.00 |
| DY2 | NG | NG | NG | | |
| DY3 | 34.5793 | 66.0604 | 0.5234 | | |
| DZ1 | 24.4951 | 65.0870 | 0.3763 | 0.33 | 0.06 |
| DZ2 | 21.6913 | 74.0704 | 0.2928 | | |
| DZ3 | NG | NG | NG | | |
| EX1 | NG | NG | NG | - | - |
| EX2 | NG | NG | NG | | |
| EX3 | NG | NG | NG | | |
| EY1 | 21.5957 | 79.0842 | 0.2731 | 0.30 | 0.03 |
| EY2 | 25.4000 | 77.1000 | 0.3294 | | |
| EY3 | 21.3000 | 69.1000 | 0.3082 | | |
| EZ1 | NG | NG | NG | - | - |
| EZ2 | NG | NG | NG | | |
| EZ3 | NG | NG | NG | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ จ-7** TF ตะกั่ว

| ตัวอย่าง | Pb ในเมล็ด+ลำต้น+ใบ | Pb ในราก | TF | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 18.8943 | 13.0961 | 1.4427 | 1.46 | 0.07 |
| RA2 | 17.5894 | 11.3932 | 1.5439 | | |
| RA3 | 17.0000 | 12.1000 | 1.4050 | | |
| CT1 | NG | NG | NG | - | - |
| CT2 | NG | NG | NG | | |
| CT3 | NG | NG | NG | | |
| BX1 | 15.5906 | 89.8461 | 0.1735 | 0.19 | 0.02 |
| BX2 | NG | NG | NG | | |
| BX3 | 18.7868 | 93.1348 | 0.2017 | | |
| BY1 | NG | NG | NG | 0.12 | 0.01 |
| BY2 | 12.7962 | 99.6701 | 0.1284 | | |
| BY3 | 14.2943 | 127.6489 | 0.1120 | | |
| BZ1 | 14.8926 | 102.4488 | 0.1454 | 0.11 | 0.03 |
| BZ2 | 12.0176 | 101.5797 | 0.1183 | | |
| BZ3 | 8.8956 | 110.3448 | 0.0806 | | |
| CX1 | 7.5162 | 112.8436 | 0.0666 | 0.08 | 0.01 |
| CX2 | NG | NG | NG | | |
| CX3 | 9.5700 | 113.2000 | 0.0845 | | |
| CY1 | 9.4981 | 121.8756 | 0.0779 | 0.08 | 0.02 |
| CY2 | 7.7000 | 128.7000 | 0.0598 | | |
| CY3 | 10.1969 | 111.5665 | 0.0914 | | |
| CZ1 | 14.7867 | 116.5951 | 0.1268 | 0.08 | 0.04 |
| CZ2 | 8.1975 | 117.5647 | 0.0697 | | |
| CZ3 | 6.0951 | 117.8058 | 0.0517 | | |
| DX1 | 11.5954 | 112.3551 | 0.1032 | 0.10 | 0.00 |
| DX2 | NG | NG | NG | | |
| DX3 | NG | NG | NG | | |
| DY1 | NG | NG | NG | 0.09 | 0.00 |
| DY2 | NG | NG | NG | | |
| DY3 | 10.3938 | 118.2291 | 0.0879 | | |
| DZ1 | 13.0974 | 102.0796 | 0.1283 | 0.10 | 0.04 |
| DZ2 | 7.1971 | 103.1587 | 0.0698 | | |
| DZ3 | NG | NG | NG | | |
| EX1 | NG | NG | NG | - | - |
| EX2 | NG | NG | NG | | |
| EX3 | NG | NG | NG | | |
| EY1 | 3.6993 | 106.0788 | 0.0349 | 0.04 | 0.01 |
| EY2 | 5.2800 | 109.4000 | 0.0483 | | |
| EY3 | 3.1900 | 105.7000 | 0.0302 | | |
| EZ1 | NG | NG | NG | - | - |
| EZ2 | NG | NG | NG | | |
| EZ3 | NG | NG | NG | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ จ-8** TF แคดเมียม

| ตัวอย่าง | Cd ในเมล็ด+ลำต้น+ใบ | Cd ในราก | TF | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---|---|---|---|---|---|
| RA1 | 4.8487 | 0.4998 | 9.7014 | 6.23 | 3.01 |
| RA2 | 3.9783 | 0.8998 | 4.4212 | | |
| RA3 | 5.0308 | 1.0998 | 4.5744 | | |
| CT1 | NG | NG | NG | - | - |
| CT2 | NG | NG | NG | | |
| CT3 | NG | NG | NG | | |
| BX1 | 6.3275 | 13.5986 | 0.4653 | 0.43 | 0.05 |
| BX2 | NG | NG | NG | | |
| BX3 | 4.9965 | 12.4488 | 0.4014 | | |
| BY1 | NG | NG | NG | 0.28 | 0.06 |
| BY2 | 3.5396 | 15.1785 | 0.2332 | | |
| BY3 | 4.2389 | 13.1174 | 0.3232 | | |
| BZ1 | 2.5087 | 14.0901 | 0.1780 | 0.21 | 0.05 |
| BZ2 | 3.0195 | 16.9198 | 0.1785 | | |
| BZ3 | 2.7288 | 10.2949 | 0.2651 | | |
| CX1 | 3.9190 | 5.4684 | 0.7167 | 0.65 | 0.09 |
| CX2 | NG | NG | NG | | |
| CX3 | 4.5072 | 7.6100 | 0.5923 | | |
| CY1 | 5.4393 | 8.6991 | 0.6253 | 0.74 | 0.28 |
| CY2 | 4.3894 | 8.1884 | 0.5360 | | |
| CY3 | 5.7279 | 5.4000 | 1.0607 | | |
| CZ1 | 6.7186 | 10.8978 | 0.6165 | 0.59 | 0.03 |
| CZ2 | 5.6179 | 10.1160 | 0.5553 | | |
| CZ3 | 5.7276 | 9.7051 | 0.5902 | | |
| DX1 | 2.8987 | 6.1163 | 0.4739 | 0.47 | 0.00 |
| DX2 | NG | NG | NG | | |
| DX3 | NG | NG | NG | | |
| DY1 | NG | NG | NG | 0.47 | 0.00 |
| DY2 | NG | NG | NG | | |
| DY3 | 4.8067 | 10.2049 | 0.4710 | | |
| DZ1 | 2.6190 | 5.1900 | 0.5046 | 0.51 | 0.01 |
| DZ2 | 2.3897 | 4.6286 | 0.5163 | | |
| DZ3 | NG | NG | NG | | |
| EX1 | NG | NG | NG | NG | NG |
| EX2 | NG | NG | NG | | |
| EX3 | NG | NG | NG | | |
| EY1 | 3.2506 | 5.3189 | 0.6111 | 0.52 | 0.08 |
| EY2 | 3.2115 | 6.4568 | 0.4974 | | |
| EY3 | 2.8176 | 6.1769 | 0.4561 | | |
| EZ1 | NG | NG | NG | NG | NG |
| EZ2 | NG | NG | NG | | |
| EZ3 | NG | NG | NG | | |

หมายเหตุ NG=Non Growth

. เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ฉ
# การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

1. การวิเคราะห์สถิติโดยใช้ paired t-test เพื่อเปรียบเทียบค่าความแปรปรวนของกลุ่มประชากร 2 กลุ่ม

1.1 การเปรียบเทียบค่าความแปรปรวนของน้ำหนักของเมล็ดข้าวที่อัตราส่วนหินปูน:ซีพิ-โอไลท์ 1:0 และ 0:1 ที่ระดับความเข้มข้น 0.2%

**Paired t test of Paired t test data**

| | Data Set-A |
|---|---|
| Table Analyzed | Paired t test data |
| Column B | 0:1 |
| vs. | vs. |
| Column A | 1:0 |
| Paired t test | |
| P value | 0.3150 |
| P value summary | ns |
| Significantly different (P < 0.05)? | No |
| One- or two-tailed P value? | Two-tailed |
| t, df | t=1.33 df=2 |
| Number of pairs | 3 |
| How big is the difference? | |
| Mean of differences | -3.927 |
| SD of differences | 5.114 |
| SEM of differences | 2.953 |
| 95% confidence interval | -16.63 to 8.778 |
| R squared (partial eta squared) | 0.4693 |
| How effective was the pairing? | |
| Correlation coefficient (r) | 0.4056 |
| P value (one tailed) | 0.3671 |
| P value summary | ns |
| Was the pairing significantly effective? | No |

**รูปที่ ฉ-1** ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักของเมล็ดข้าวที่อัตราส่วนหินปูน:ซีพิโอไลท์ 1:0 และ 0:1 ที่ระดับความเข้มข้น 0.2%

จากรูป ฉ-1 พบว่าการคำนวณค่าทางสถิติเปรียบเทียบค่าน้ำหนักเมล็ดข้าวในปลูกในดินผสมหินปูน:ซีพิโอไลท์ 1:0 และ 0:1 ระดับความเข้มข้น 0.2% ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p>0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 การเปรียบเทียบค่าความแปรปรวนของปริมาณทองแดงทั้งหมด ดินก่อนการทดลองและดินหลังการทดลอง

**Paired t test of Paired t test data**

| | Data Set-A |
|---|---|
| Table Analyzed | Paired t test data |
| Column B | After |
| vs. | vs. |
| Column A | Before |
| Paired t test | |
| P value | <0.0001 |
| P value summary | **** |
| Significantly different (P < 0.05)? | Yes |
| One- or two-tailed P value? | Two-tailed |
| t, df | t=9.602 df=41 |
| Number of pairs | 42 |
| How big is the difference? | |
| Mean of differences | -34.89 |
| SD of differences | 23.55 |
| SEM of differences | 3.634 |
| 95% confidence interval | -42.23 to -27.55 |
| R squared (partial eta squared) | 0.6922 |
| How effective was the pairing? | |
| Correlation coefficient (r) | 0.6899 |
| P value (one tailed) | <0.0001 |
| P value summary | **** |
| Was the pairing significantly effective? | Yes |

**รูปที่ ฉ-2** ความแตกต่างระหว่างปริมาณทองแดงทั้งหมดในดินก่อนการทดลองและดินหลังการทดลอง

จากรูป ฉ-2 พบว่าการคำนวณค่าทางสถิติเปรียบเทียบค่าทองแดงทั้งหมดในดินก่อนและหลังการปลูกข้าวแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p$<0.05)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 การเปรียบเทียบค่าความแปรปรวนของปริมาณสังกะสีทั้งหมด ดินก่อนการทดลองและดินหลังการทดลอง

**Paired t test of Paired t test data**

| | Data Set-A |
|---|---|
| Table Analyzed | Paired t test data |
| Column B | After |
| vs. | vs. |
| Column A | Before |
| Paired t test | |
| P value | <0.0001 |
| P value summary | **** |
| Significantly different (P < 0.05)? | Yes |
| One- or two-tailed P value? | Two-tailed |
| t, df | t=11.68 df=41 |
| Number of pairs | 42 |
| How big is the difference? | |
| Mean of differences | -83.72 |
| SD of differences | 46.46 |
| SEM of differences | 7.17 |
| 95% confidence interval | -98.2 to -69.24 |
| R squared (partial eta squared) | 0.7688 |
| How effective was the pairing? | |
| Correlation coefficient (r) | 0.5949 |
| P value (one tailed) | <0.0001 |
| P value summary | **** |
| Was the pairing significantly effective? | Yes |

**รูปที่ ฉ-3** ความแตกต่างระหว่างปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินก่อนการทดลองและดินหลังการทดลอง

จากรูป ฉ-3 พบว่าการคำนวณค่าทางสถิติเปรียบเทียบค่าสังกะสีทั้งหมดในดินก่อนและหลังการปลูกข้าวแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 การเปรียบเทียบค่าความแปรปรวนของปริมาณตะกั่วทั้งหมด ดินก่อนการทดลองและดินหลังการทดลอง

**Paired t test of Paired t test data**

| | Data Set-A |
|---|---|
| Table Analyzed | Paired t test data |
| Column B | After |
| vs. | vs. |
| Column A | Before |
| Paired t test | |
| P value | <0.0001 |
| P value summary | **** |
| Significantly different (P < 0.05)? | Yes |
| One- or two-tailed P value? | Two-tailed |
| t, df | t=10.93 df=41 |
| Number of pairs | 42 |
| How big is the difference? | |
| Mean of differences | -100 |
| SD of differences | 59.33 |
| SEM of differences | 9.154 |
| 95% confidence interval | -118.5 to -81.54 |
| R squared (partial eta squared) | 0.7444 |
| How effective was the pairing? | |
| Correlation coefficient (r) | 0.3585 |
| P value (one tailed) | 0.0099 |
| P value summary | ** |
| Was the pairing significantly effective? | Yes |

**รูปที่ ฉ-4** ความแตกต่างระหว่างปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดินก่อนการทดลองและดินหลังการทดลอง

จากรูป ฉ-4 พบว่าการคำนวณค่าทางสถิติเปรียบเทียบค่าตะกั่วทั้งหมดในดินก่อนและหลังการปลูกข้าวแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 การเปรียบเทียบค่าความแปรปรวนของปริมาณแคดเมียมทั้งหมด ดินก่อนการทดลองและดินหลังการทดลอง

**Paired t test of Paired t test data**

| | Data Set-A |
|---|---|
| Table Analyzed | Paired t test data |
| Column B | After |
| vs. | vs. |
| Column A | Before |
| Paired t test | |
| P value | <0.0001 |
| P value summary | **** |
| Significantly different (P < 0.05)? | Yes |
| One- or two-tailed P value? | Two-tailed |
| t, df | t=14.73 df=41 |
| Number of pairs | 42 |
| How big is the difference? | |
| Mean of differences | -3.444 |
| SD of differences | 1.515 |
| SEM of differences | 0.2338 |
| 95% confidence interval | -3.916 to -2.972 |
| R squared (partial eta squared) | 0.8411 |
| How effective was the pairing? | |
| Correlation coefficient (r) | 0.1547 |
| P value (one tailed) | 0.1640 |
| P value summary | ns |
| Was the pairing significantly effective? | No |

**รูปที่ ฉ-5** ความแตกต่างระหว่างปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินก่อนการทดลองและดินหลังการทดลอง

จากรูป ฉ-5 พบว่าการคำนวณค่าทางสถิติเปรียบเทียบค่าแคดเมียมทั้งหมดในดินก่อนและหลังการปลูกข้าวแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p$<0.05)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้เขียน

| | |
|---|---|
| **ชื่อ** | นางสาวกฤตยา กระทุ่มเขตร์ |
| **วัน เดือน ปีเกิด** | 20 กันยายน พ.ศ. 2531 |
| **ที่อยู่** | 85/58 หมู่ที่ 5 ตำบลบางเมืองใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ 10270 |
| **ประวัติการศึกษา** | 2554 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร เกรดเฉลี่ย 2.35 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก<br>2560 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม เกรดเฉลี่ย 3.25 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| **ผลงานวิชาการ** | เรื่อง การลดปริมาณของตะกั่วที่สะสมในข้าวและดินนาโดยใช้หินปูนและซีพิโอไลท์ (REDUCTION OF LEAD ACCUMULATION IN RICE AND PADDY SOIL USING LIMESTONE AND SEPIOLITE) การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 10 ระหว่างวันที่ 24-25 พฤษภาคม 2561 ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม |

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้