3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

อิทธิพลของยิปซัมต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน พื้นที่ปลูกยาสูบจังหวัดสุโขทัย

อภิสิทธิ์ นาสอน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติ
และสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
มิถุนายน 2562

อิทธิพลของยิปซัมต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน พื้นที่ปลูกยาสูบจังหวัดสุโขทัย

อภิสิทธิ์ นาสอน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติ
และสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
มิถุนายน 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

3233077542 URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

Effect of gypsum on chemical form of cadmium in tobacco planting soil in Sukhothai province

Aphisit Nason

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements for
Master of Science Program in Natural Resources and
Environmental Management
Uttaradit Rajabhat University
June 2019

Copyright of Uttaradit Rajabhat University

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของยิปซัมต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน

พื้นที่ปลูกยาสูบจังหวัดสุโขทัย

ของ

อภิสิทธิ์ นาสอน

ได้รับการพิจารณาเห็นชอบจากคณะกรรมการที่ปรึกษาและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

เมื่อวันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทร์เพ็ญ ชุมแสง)

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(อาจารย์ ดร. ฉลวย เสาวคนธ์)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์เพ็ญ ชุมแสง)	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมคิด ทุ่นใจ)
ประธานกรรมการบัณฑิตศึกษาประจำหลักสูตร	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
(อาจารย์ ดร.เชาวฤทธิ์ จั่นจีน)	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรืองเดช วงศ์หล้า)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย	อธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง อิทธิพลของยิปซัมต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน พื้นที่ปลูกยาสูบจังหวัดสุโขทัย

ผู้วิจัย นายอภิสิทธิ์ นาสอน

ปริญญา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทร์เพ็ญ ชุมแสง

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร. ณัฐกฤตา บุณณ์ประกอบ

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองศึกษาอิทธิพลของยิปซัมต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมในดินพื้นที่ปลูกยาสูบ วางแผนการทดลองแบบ RCBD ทั้งหมด 4 ซ้ำ มีปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ตัวแทนชุดดินจากพื้นที่ปลูกยาสูบ ระดับการปนเปื้อนแคดเมียมในดินอัตราการใส่ยิปซัม และการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมตามช่วงระยะเวลาการบ่มดิน ใช้ดินตัวแทนจากพื้นที่ปลูกยาสูบ ซึ่งมีเนื้อดินต่างกัน 3 ชุดดินเป็นตัวแทนชุดดินในการทดลอง ดำเนินการทดลองโดยใส่ยิปซัมสังเคราะห์จากกระบวนการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (FGD gypsum) ในปริมาณต่าง ๆ 3 ระดับ คือ 0, 4, 8 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้งจากนั้นเติมสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ให้ดินมีระดับการปนเปื้อนแคดเมียมในดิน 2 ระดับคือ 5 และ 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นำดินไปบ่มในตู้บ่มซึ่งควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25±1 °C บ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน เมื่อครบกำหนดตามช่วงเวลาบ่มดิน นำตัวอย่างดินมาสกัดรูปทางเคมีของแคดเมียมในดินตามวิธีการสกัดลำดับขั้นวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียวเปรียบเทียบผลต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี LSD ด้วยหลักการทดสอบที่($p>0.05$)และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในแต่ละรูปเคมีตามช่วงระยะเวลาบ่มดิน

ผลการวิจัยพบว่า การใส่ยิปซัมลงในดินมีทั้ง 3 ชนิดดิน มีผลให้ทำแคดเมียมรูปที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพในดิน (รูปอิสสระในสารละลายดินและรูปที่แลกเปลี่ยนได้) มีปริมาณความเข้มข้นและสัดส่วนการกระจายตัวลดลง (ลดลงร้อยละ 10.80) เมื่อระยะเวลาการบ่มดินเพิ่มขึ้น ในขณะที่แคดเมียมในรูปที่อยู่ในสภาพไม่พร้อมใช้ทางชีวภาพ (รูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส รูปออร์แกนิก และรูปที่เหลือจากการสกัด) มีปริมาณความเข้มข้นและสัดส่วนการกระจายตัวเพิ่มขึ้น โดยรูปแบบการแพร่กระจายของแคดเมียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้มากที่สุด รองลงมาได้แก่แคดเมียมรูปคาร์บอเนตและรูปที่เหลือจากการสกัด และสัดส่วนการกระจายของแคดเมียมรูปออร์แกนิกในดินมีน้อยที่สุด ซึ่งรูปทางเคมีและการแพร่กระจายความเข้มข้นของ

3233077542 URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

แคดเมียมในดินสัมพันธ์กับอัตราการใส่ยิปซัม (r=0.989) ระดับการปนเปื้อนแคดเมียมในดิน (r= 0.807) ระยะเวลาที่บ่มดิน (r=0.905) และสมบัติของดิน กล่าวได้ว่าการใส่ยิปซัมลงในดินจะสามารถลดความเป็นพิษของแคดเมียมในดินได้ และระดับการปนเปื้อนแคดเมียมในดินที่มากมีผลทำให้ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมทั้ง 6 รูปมีปริมาณความเข้มข้นและสัดส่วนการกระจายมากขึ้นเช่นกัน อีกทั้งระยะเวลาที่บ่มดินมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและการกระจายตัวของแคดเมียมทั้ง 6 รูปอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะช่วงเวลา 1-14 วันหลังบ่มดิน นอกจากนั้นสมบัติดินที่ต่างกัน ยังมีผลทำให้ดินมีการดูดซับและแพร่กระจายแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพต่างกัน ในขณะที่การใส่ยิปซัมลงในดินมีผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญสัมพันธ์กับอัตราการใส่ยิปซัม (r=0.997)

คำสำคัญ : แคดเมียม, ยิปซัม, ยาสูบ, ดิน

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ABSTRACT

Title Effect of gypsum on chemical form of cadmium in tobacco planting soil in Sukhothai province

Author Aphisit Nason

Degree Master of Science Program in Natural Resources and Environmental Management

Advisor Assistant Professor Dr. Chanphen Chumsang

Co-Advisors Dr. Natkritta Boonprakob

This study was an experimental research which aimed to perform an experiment on the influence of gypsum on the chemical forms of cadmium in the tobacco growing area soil in Sukhothai Province. Four replications of randomized complete block designs (RCBD's) were applied according to the plan. Key study factors were: representative soil samples from tobacco growing areas, cadmium contamination levels in the soil, gypsum filling rate, and cadmium chemical transformation in accordance with the soil incubation periods. Three different representative soil samples from tobacco growing areas were tested in the experiment. The experiment was conducted by using synthetic gypsum from the Flue Gas Desulfurization (FGD gypsum) of Mae Moh Power Plant added to the soil in 3 different levels: 0%, 4%, and 8% per soil weight with 2 levels of cadmium contamination at 5 mg/kg and 30 mg/kg in the form of cadmium chloride solution. The soils were incubated in the incubator under the controlled temperature at 25±1 $^{\circ}$C for a duration of 1, 3, 7, 14, 21, 28, and 60 days. When the incubation was complete, the chemical form of cadmium was extracted from the sample soils through the analytical hierarchy process. The data analysis used was one-way ANOVA, least significant difference (LSD), and T-test as well as an analysis of the transformed cadmium concentration changes over soil incubation time.

The results showed that the addition of gypsum into all 3 concentration soil samples: lowered the concentration and distribution ratio of bioavailable cadmium (in free particle form in soil solution and exchangeable form) (a 10.80

percent decline) in relation to an increase in soil incubation period; at the same time, increased the concentration and distribution ratio of cadmium formations with no bioavailability (in forms of carbonate, iron and manganese oxide, organic, and residual). The most distributed formation of cadmium in soil was exchangeable, followed by the carbonate form and the residual form whereas the organic form had the least distribution ratio. It also showed that the chemical formations and concentration distribution of cadmium in soil were related to: gypsum filling rate (r=0.989), cadmium contamination level (r=0.807), soil incubation period (r=0.905), and the soil structure. The results pointed that adding gypsum was able to reduce cadmium toxicity, and the higher level of cadmium contamination brought to higher all 6 formations of cadmium in both concentration and distribution ratio. The incubation periods significantly influenced the concentration and distribution of the 6 forms of cadmium especially during 1 – 14 days after the incubation. Moreover, different soil structures affected soil absorption and distribution of bioavailable cadmium while adding gypsum raised the soil pH significantly relied on the filling ratio (r=0.997).

Keyword : cadmium, tobacco, gypsum, Soil

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์เพ็ญ ชุมแสง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และดร.ณัฐกฤตา บุญณ์ประกอบ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ตลอดจนความช่วยเหลือในด้านต่างๆรวมทั้งได้สละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา และตรวจแก้ไขข้อผิดพลาดตลอดการทำวิจัย ขอกราบขอบพระคุณทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ประจำหลักสูตรการจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เจ้าหน้าที่ศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ รวมทั้งพี่ๆ ร่วมรุ่นทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลืออย่างดีในการทำวิจัยจนสำเร็จ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ได้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว นาสอน และครอบครัว ทานะกาศ ที่ได้ให้การสนับสนุนและคอยช่วยเหลือรวมทั้งเป็นกำลังใจในการศึกษามาตลอดจนสำเร็จการศึกษา

อภิสิทธิ์ นาสอน

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

สารบัญ

บทที่ **หน้า**

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ

กิตติกรรมประกาศ ..... ซ

สารบัญ ..... ฌ

สารบัญตาราง ..... ฏ

สารบัญภาพ ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

คำถามการวิจัย 3

วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

ขอบเขตการวิจัย 3

นิยามศัพท์เฉพาะ 4

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 4

กรอบแนวคิดการวิจัย 5

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

แคดเมียม 6

การนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์ 16

การปนเปื้อนแคดเมียมในดิน 21

ยิปซัม (Gypsum) 26

การใช้ยิปซัมบำบัดโลหะหนักในดิน 36

ยาสูบ 37

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 44
บทที่ 3 ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย 47
การศึกษาอิทธิพลของยิปซัมต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน 47
วิธีการดำเนินการศึกษา 48
การวิเคราะห์ข้อมูล 50
การสกัดลำดับขั้น (Sequential Extraction) 50
การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินทดลอง 53
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล 54
สมบัติดินที่ใช้ในการทดลอง 54
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่แตกต่างกันตามช่วงเวลา
หลังใส่ยิปซัมและแคดเมียมในดิน 3 ชนิด 57
อิทธิพลของยิปซัมต่อการแพร่กระจายของรูปทางเคมีของแคดเมียมในดินทั้ง 3 ชนิด
หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน 81
ความสัมพันธ์ระหว่างรูปทางเคมีของแคดเมียมกับอัตราการใส่ยิปซัม และสมบัติดินทั้ง 3 ชนิด 86
การเปลี่ยนค่า pH ของดินหลังการทดลอง 87
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 90
สรุปผลการวิจัย 90
อภิปรายผล 91
ข้อเสนอแนะ 98
บรรณานุกรม 99
ภาคผนวก 106
ภาคผนวก ก การแปลผลสมบัติทางเคมีของดิน และระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนัก 107

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ภาคผนวก ข การเปลี่ยนแปลงเข้มข้นของแคดเมียมในรูปเคมีต่าง ๆ ในดินหลังจาก
บ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน 111

ภาคผนวก ค การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดินหลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21,
28, และ 60 วัน 118

ภาคผนวก ง สัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีทั้ง 6 รูป ในดิน 3 ชนิด ... 120

ประวัติย่อผู้วิจัย 127

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของแคดเมียมและสารประกอบแคดเมียม..... 8

ตารางที่ 2 ปริมาณแคดเมียมในพืช (mg/kg)..... 17

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเอฟจีดียิปซัม..... 36

ตารางที่ 4 ขั้นตอนการสกัดลำดับขั้น..... 52

ตารางที่ 5 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง..... 57

ตารางที่ 6 การแพร่กระจายของแคดเมียมในแต่ละรูปเคมี ในดินทั้ง 3 ชนิด
หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน..... 84

ตารางที่ 7 การเปลี่ยนแปลงเข้มข้นของแคดเมียมในรูปเคมีต่าง ๆ (mg/kg) ในดินร่วนเหนียว
หลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน..... 111

ตารางที่ 8 การเปลี่ยนแปลงเข้มข้นของแคดเมียมในรูปเคมีต่าง ๆ (mg/kg) ในดินร่วน
หลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน..... 113

ตารางที่ 9 การเปลี่ยนแปลงเข้มข้นของแคดเมียมในรูปเคมีต่าง ๆ (mg/kg) ในดินร่วนทราย
หลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน..... 115

ตารางที่ 10 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดินหลังทดลอง..... 118

ตารางที่ 11 สัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปเคมีทั้ง 6 รูป ในดินร่วนเหนียว
หลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน..... 120

ตารางที่ 12 สัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปเคมีทั้ง 6 รูป ในดินร่วน
หลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน..... 122

ตารางที่ 13 สัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปเคมีทั้ง 6 รูป ในดินร่วนทราย
หลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน..... 124

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

ภาพที่ 1 แสดงกรอบแนวคิดในการวิจัย..... 5

ภาพที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน
ในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังใส่แคดเมียม..... 60

ภาพที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้
ในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังใส่แคดเมียม.....64

ภาพที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปคาร์บอเนต
ในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังใส่แคดเมียม.....67

ภาพที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส
ในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังเติมแคดเมียม.....71

ภาพที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปออร์แกนิก
ในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังใส่แคดเมียม.....75

ภาพที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด
ในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังใส่แคดเมียม.....79

ภาพที่ 8 สัดส่วนการแพร่กระจายของปริมาณแคดเมียมในแต่ละรูปเคมี
หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน..... 82

ภาพที่ 9 แสดงการเปลี่ยนค่า pH ของดินหลังการทดลอง.....89

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พื้นที่ทางการเกษตรที่มีระบบการเพาะปลูกแบบเคมีอย่างเข้มข้น ยังเป็นอีกแหล่งหนึ่งของการปนเปื้อนแคดเมียมลงสู่ดินโดยเฉพาะแปลงเพาะปลูกยาสูบ ซึ่งจากการวิเคราะห์ตัวอย่างดินจากแปลงยาสูบแบบเคมีจากจังหวัดสุโขทัยจำนวน 45 ตัวอย่าง พบว่าดินมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดอยู่ในช่วง 3.27-5.08 mg/kg ซึ่งอยู่ในระดับที่เกินเกณฑ์พื้นฐานที่แนะนำสำหรับการปนเปื้อนแคดเมียมในดินของประเทศไทย (0.15 mg/kg) และยังสูงกว่าค่าอนุโลมสูงสุดที่ยอมให้มีได้ของประชาคมเศรษฐกิจยุโรป (3 mg/kg) (กรมวิชาการเกษตร, 2558, น.3; จันทร์เพ็ญ ชุมแสงและณิชารีย์ ใจคำวัง, 2558, น.63) แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ปลูกยาสูบบางพื้นที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมสูงกว่าในดินทั่วไปในธรรมชาติ ในขณะที่ยาสูบเองเป็นพืชที่สามารถดูดซับแคดเมียมที่มีอยู่ในดินได้ดี ซึงจากรายงานผลการศึกษาของปรีชา บุญจงและคณะ (2550, น.36-42) พบว่าในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยาสูบ จำนวน 13 ตัวอย่าง มีปริมาณแคดเมียมอยู่ในช่วง 1.05-1.82 µg แต่อย่างไรก็ตามนดินเองก็เป็นแหล่งของการกักเก็บและบำบัดแคดเมียมที่มีศักยภาพหากได้รับการจัดการที่เหมาะสม ดินสามารถใช้เป็นแหล่งบำบัดแคดเมียมได้ เนื่องจากดินเป็นสถานที่อันตรายจากธาตุพิษน้อยที่สุด ในวงจรการเดินทางของธาตุพิษในระบบดิน พืช และสัตว์ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541, น.562) แต่ถึงแม้ว่าดินจะเป็นแหล่งกักเก็บหรือบำบัดแคดเมียมได้ แต่ดินที่ต่างชนิดกันย่อมมีสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ต่างกันและย่อมส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมต่างกัน เพราะปัจจัยสำคัญที่ความคุมการสะสมปริมาณแคดเมียมในดิน ได้แก่ความสามรถในการดูดซับของดิน ชนิดและปริมาณของอนุภาคดินเหนียว ปริมาณอินทรียวัตถุ และค่า pH ของดินที่เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดต่อการเคลื่อนย้ายและการตกค้างอยู่ในดินตลอกจนการแพร่กระจายของแคดเมียมของแคดเมียมในดิน (Sauev et al., 2009, p.291) จะเห็นได้ว่าแม้ดินจะเป็นแหล่งกักเก็บแคดเมียมได้ แต่ก็มีความผันแปรตามธรรมชาติของดินแต่ละชนิด เพราะปัจจัยสภาพแวดล้อมจะส่งผลให้สมบัติของดินบางประการเปลี่ยนไปซึ่งจะมีผลต่อการแพร่กระจายรูปทางเคมี และความเป็นพิษของแคดเมียมในดิน ดังนั้นการจะลดปัญหาความเป็นพิษและการแพร่กระจายของแคดเมียมในดินได้ ควรทำโดยการเปลี่ยนรูปให้เป็นของแข็งและการปรับเสถียร เช่น เมื่อน้ำดินปนเปื้อนโลหะหนักมาผสมกับน้ำและปูนขาว ปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับโลหะหนักให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ (ธเรศ ศรีสถิต, ม.ป.ป., น.3) โดยควรเลือกใช้วัสดุที่หาง่ายราคาถูก และมีปริมาณมาก ซึ่งวัสดุอีกชนิดที่มีศักยภาพดังที่กล่าวมาคือ ยิปซัม

3233077542 URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ยิปซัมเป็นแร่ที่มีในธรรมชาติและเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการทางอุตสาหกรรม มีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมและซัลเฟต (Ca 40.1%; SO_4 56%) (Yubo Yan et al., 2014, p.68) สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางการเกษตรเพื่อเป็นวัสดุปรับปรุงดินได้ (ปิยะ ดวงพัตรา, 2553, น. 63) ยิปซัมยังเป็นแหล่งของธาตุอาหารพืช ทั้งแคลเซียม (Ca) และกำมะถัน (S) ซึ่งจัดเป็นธาตุอาหารรองสำหรับพืชและมีความจำเป็นสำหรับพืชหลายประเภท (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554, น.121) นอกจากนั้นยิปซัมยังสามารถนำมาใช้ในการบำบัดโลหะหนัก เช่น แคดเมียม ปรอทและตะกั่วได้ ซึ่งมีนักวิชาการหลายท่านได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากยิปซัมในการบำบัดโลหะหนักในดิน อาทิ การศึกษาของ (ยุทธ์ดนัย ยอดทองดี, 2555, น.125) ที่ใช้เอฟจีดียิปซัมเพื่อลดการกักเก็บโลหะหนักในพืชซึ่งพบว่า พืชที่ปลูกในดินทอดลองที่มีการผสมยิปซัมมีการสะสมโลหะหนักในปริมาณน้อยมากในขณะที่ตรวจไม่พบแคดเมียมในพืชทดสอบเลย และการศึกษาของ ทัศนางกูล ตุลยากรณ์ (2553, น.13) พบว่าฟอสโฟยิปซัมปรับสภาพสามารถดูดซับโลหะสังกะสี นิกเกิลและทองแดงได้ ในขณะที่การศึกษาของ (วราภร สิทธินาง, 2554, น. 162) ที่ใช้ยิปซัมในการเตรียมวัสดุดูดซับร่วมกับขี้เลื่อยพบว่า สามารถลดปริมาณสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้ นอกจากนั้น Ping Yang, (2015, p.7846); Yubo Yan Xiaoli Dong, (2014, p.68) ยังได้รายงานผลการศึกษาว่า ยิปซัมมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียได้ได้ 56.5 % และ 24.6 % ตามลำดับ อีกทั้งสามารถกำจัดแคดเมียมในดินชั้นบน (0-30 ซ.ม.) ได้ 30.5 % ซึ่งการใช้ยิปซัมปรับปรุงดินยังไม่ส่งผลกระทบในด้านลบกับพืชที่ปลูกถึงแม้จะใส่ในอัตราที่สูงก็ตาม (ยุทธ์ดนัย ยอดทองดี, 2555, น.169)

เห็นได้ว่ายิปซัมนั้นเป็นวัสดุทางเลือกหนึ่งที่มีศักยภาพในการนำมาใช้บำบัดแคดเมียมได้ แต่การวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมส่วนมากจะวิเคราะห์ความเข้มข้นรูปของปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total Cd) ซึ่งไม่เพียงพอต่อการประเมินผลของยิปซัมต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียม การแพร่กระจายและสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพของแคดเมียม อย่างไรก็ตามตามวิธีการสกัดลำดับขั้น (Sequential Extraction) จะช่วยอธิบายและสามารถให้ข้อมูลความสัมพันธ์ของรูปทางเคมีของแคดเมียมที่เป็นผลมาจากยิปซัมและเคมีของดินนั้น ซึ่งผลที่ได้จากการสกัดลำดับขั้นยังช่วยบ่งชี้ถึงผลของยิปซัมที่มีต่อการแพร่กระจายของแคดเมียมในรูปต่าง ๆได้ เพื่อใช้ในการประเมินถึงสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพและความเป็นพิษของแคดเมียมในดิน (จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2525, น.57) และจากการประเมินองค์ความรู้ในประเทศไทย ยังมีการศึกษาถึงประสิทธิภาพของยิปซัมที่ส่งผลต่อและการเปลี่ยนรูปทางเคมีและการแพร่กระจายของแคดเมียมในดินค่อนข้างน้อย ดังนั้นจึงยังขาดองค์ความรู้ความและเข้าใจในเรื่องดังกล่าวอยู่พอสมควร รวมถึงข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ยิปซัมสังเคราะห์ในการบำบัดโลหะหนักในดินมีอยู่อย่างจำกัด ในขณะที่ยิปซัมสังเคราะห์เป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการบำบัดได้ และยังเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการอุตสาหกรรมที่มีราคาถูก มีปริมาณมากถึง 2.25 ล้านตันต่อปี (จุฑาภรณ์ ผลิตัน, 2556, น.2) จึงมียิปซัมเหลือปริมาณมาก ซึ่งเป็นของเสีย

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

ที่ต้องมีค่าใช้จ่ายในการกำจัด หากมีแนวทางนำมาใช้ประโยชน์อย่างอื่นที่จะเป็นประโยชน์ ก็จะเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปริมาณของเสียเหล่านี้ได้อีกทางหนึ่ง ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการที่จะนำมาใช้เพื่อบำบัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินพื้นที่การเกษตร

จากความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงศึกษาอิทธิพลของยิปซัมต่อรูปทางเคมีของแคดเมียม โดยทำการวิจัยผลของการปรับปรุงดินโดยใช้ยิปซัมต่อรูปทางเคมีของแคดเมียม ผลต่อการเคลื่อนย้าย การแพร่กระจายและการเปลี่ยนรูปทางเคมี ในดินที่ต่างชนิดกันและระดับการปนเปื้อนแคดเมียมต่างกันเพื่อความรู้และข้าใจใน กระบวนการเปลี่ยนรูปของแคดเมียมในดินอันเป็นผลมาจากยิปซัม เป็นการพัฒนาเทคโนโลยีวิธีการบำบัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในพื้นที่การเกษตร ได้ทางหนึ่ง

คำถามการวิจัย

1. การใช้ยิปซัมเป็นวัสดุปรับปรุงดินจะมีผลต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมทั้ง 6 รูปในดินอย่างไร
2. ระยะเวลาที่แคดเมียมตกค้างในดินมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทางแคมีของแคดเมียมในดินหรือไม่อย่างไร
3. ที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียมที่ต่างกันมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมอย่างไร
4. สมบัติของดินที่ต่างกันมีผลต่อการดูดซับและปลดปล่อยแคดเมียมในรูปทางเคมีต่าง ๆ อย่างไร

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการใส่ยิปซัม ($CaSO_4$) ต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน
2. เพื่อศึกษาระยะเวลาที่มีผลต่อการแพร่กระจายและการเปลี่ยนรูปทางเคมีของแคดเมียมในเนื้อดินที่ต่างกัน

ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตด้านพื้นที่

พื้นที่ศึกษา ได้แก่ พื้นที่ปลูกยาสูบบ้านบางคลอง ตำบลปากแคว อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ขอบเขตด้านเนื้อหา

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของการใช้ยิปซัมปรับปรุงดินต่อรูปทางเคมีของแคดเมียม โดยวิจัยอิทธิพลของยิปซัม เนื้อดิน และระดับความเข้มข้นของแคดเมียมดังนี้

1. ศึกษาผลของอัตราการใส่ยิปซัม 3 ระดับ (0, 4, 8 %ของน้ำหนักดิน)ต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน ทั้งหมด 6 รูป ได้แก่ รูปอิสระในสารละลายดิน (Water soluble-bound), รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable-Bound), รูปคาร์บอเนต (Carbonate-Bound), รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn Oxide-Bound) รูปอินทรีย์ (Organic Matter-Bound) และรูปที่คงเหลือจากการสกัด (Residue) ตามช่วงระยะเวลา 7 ช่วงระยะเวลา

2. ศึกษาผลของชนิดดินที่มีความแตกต่างกัน 3 ชนิด ต่อการดูดซับและเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน

3. ศึกษาผลของระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เติมลงในดิน (5, 30 mg/kg $CdCl_2$) ต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมในดินในแต่ละรูป

4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินบางประการ ได้แก่ เนื้อดิน pH ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (Organic matter; OM) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity; CEC) และแคดเมียมในดิน

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ยิปซัม ในงานวิจัยนี้ หมายถึง ยิปซัมจากกระบวนการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน

2. รูปทางเคมีของแคดเมียม หมายถึง รูปทางเคมีของแคดเมียมในดินทั้งหมด 6 รูป ได้แก่ รูปอิสระในสารละลายดิน (Water Soluble- Bound), รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable-Bound), รูปคาร์บอเนต (Carbonate-Bound), รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn Oxide-Bound) รูปอินทรีย์ (Organic Matter-Bound) และรูปที่คงเหลือจากการสกัด (Residue)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

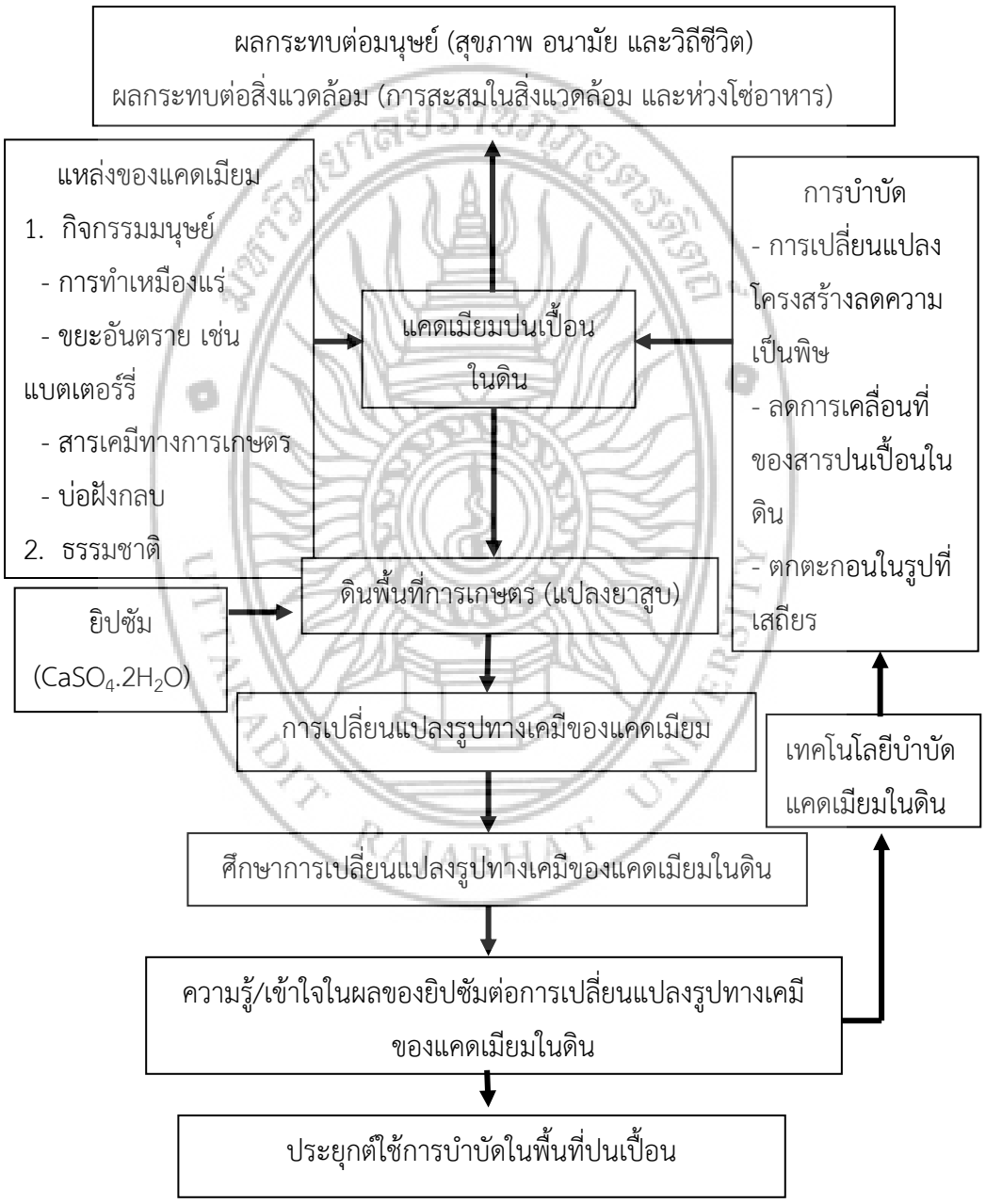
1. เพื่อให้ทราบและเป็นความรู้พื้นฐานถึงอิทธิพลของยิปซัมที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมในเนื้อดินชนิดต่าง ๆ เมื่อมีระยะเวลาการบ่มดินมากขึ้น

2. สามารถต่อยอดผลการศึกษาเป็นเทคโนโลยีวิธีการบำบัดแคดเมียมในดินพื้นที่การเกษตร ที่มีความปลอดภัยต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

3. สามารถเป็นแนวทาง/ทางเลือกการนำยิปซัมที่เหลือจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาใช้ในการบำบัด/ลดรูปความเป็นพิษของแคดเมียมในดินพื้นที่การเกษตร

กรอบแนวคิดการวิจัย



ภาพที่ 1 แสดงกรอบแนวคิดในการวิจัย

URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยเรื่อง อิทธิพลของยิปซัมต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมในดินพื้นที่ปลูกยาสูบจังหวัดสุโขทัย ผู้วิจัยได้ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้วนำมาสรุปรวมรวมนำเสนอเนื้อหาตามลำดับหัวข้อดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. แคดเมียม
2. การปนเปื้อนแคดเมียมในดิน
3. ยิปซัม
4. ยาสูบ
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แคดเมียม

ในตารางธาตุแคดเมียมอยู่ติดกับสังกะสี จึงมีลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีที่คล้ายคลึงกันแต่แคดเมียมมีความเป็นพิษสูง แคดเมียมสามารถเข้ามาแทนที่สังกะสีในระบบเอนไซน์เนื่องจากมีโครงสร้างของอะตอมคล้ายกัน ตัวอย่างเช่นแคดเมียมสามารถแทนที่สังกะสีในระบบเอนไซน์ Carboxypeptidase ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายเปปไทด์ แคดเมียมจะพบร่วมกับสังกะสีในดินเสมอ โดยมีอัตราส่วน Cd/Zn ในช่วงประมาณ 1:100 ถึง 1:1000 (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540, น.258)

สมบัติทางกายภาพและเคมี

กรมควบคุมมลพิษ (2541, น.9-10) ได้กล่าวถึง สมบัติทางกายภาพและเคมีของแคดเมียมไว้ว่า แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่มีสมบัติเบา อ่อน ดัดงอได้ง่าย และทนต่อการกัดกร่อน มีความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) 8.65 จุดหลอมละลาย (Melting Point) 320.9 $^{\circ}$C จุดเดือด (Boiling Point) 767 $^{\circ}$C

ของแคดเมียมมีความดันไอ (Vapor Pressure) มีค่า 1.4 mm. ที่ 400 $^{\circ}$C และที่ 16 mm. ที่ 500 $^{\circ}$C ดังนั้นกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูง เช่น การอบแร่ การบัดกรี การหลอมเศษเหล็กและการเผาของเสีย (Incineration) จะทำให้มีไอแคดเมียมออกมาได้ในระหว่างกระบวนการ และไอของแคดเมียมในอากาศจะถูกออกซิไดซ์อย่างรวดเร็วไปเป็นแคดเมียมออกไซด์ (CdO) ซึ่งแคดเมียมเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในกรดไนตริก และในกรดไฮโดรคลอริค จะละลายได้อย่างช้า ๆ

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

แคดเมียมจะละลายได้ในกรดอ่อน จากสมบัตินี้แคดเมียมจึงเป็นอันตรายต่อคนแบบเฉียบพลันเมื่อกินเข้าไป

สารประกอบของแคดเมียม เช่น แคดเมียมคลอไรด์ ($CdCl_2$) และแคดเมียมไนเตรต ($Cd(NO_3)_2$) เป็นสารประกอบที่ไม่มีสีและละลายได้ดีในน้ำ นอกจากนี้แคดเมียมยังสามารถรวมกับสารอื่น ๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ โดยเฉพาะเมื่อรวมกับ ไซยาไนด์และ Amines Alkyl-cadmium Compounds เป็นสารประกอบที่ไม่คงตัว (Unstable) ไม่เหมือนกับสารประกอบกลุ่ม Akyl-Mercury กล่าวคือ Alkyl-Cadmium Compounds จะทำปฏิกิริยากับน้ำหรือไอน้ำในบรรยากาศอย่างรวดเร็ว

สมบัติทางกายภาพและเคมีของแคดเมียมและสารประกอบแคดเมียมที่สำคัญ แสดงในตารางที่ 1

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

URU ithesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของแคดเมียมและสารประกอบแคดเมียม

สาร (สูตรทางเคมี)	น้ำหนักอะตอมหรือโมเลกุล	สถานภาพ	ความถ่วงจำเพาะ	จุดหลอมละลาย	จุดเดือด	การละลาย
Cadmium (Cd)	112.4	เป็นผงสีน้ำเงินแกมขาวหรือสีเทา	8.642	321	767 ± 2	ไม่ละลายในน้ำเย็นและน้ำร้อน ละลายในแอมโมเนียมไนเตรต (NH_4NO_2) ละลายในกรดซัลฟูริคที่ร้อน
Cadmium oxide (CdO)	128.41	เป็นผงสีน้ำตาลแดง	6.95	> 1230	1559	ไม่ละลายทั้งนำน้ำร้อนและน้ำเย็นละลายได้ในสารละลายเกลือแอมโมเนีย ไม่ละลายในด่าง
Cadmium chloride ($CdCl_2$)	183.32	เป็นผลึกไม่มีสี	4.047 (25 °C)	568	960	ละลายในน้ำ 1.4 kg/L (20 °C) และ 1.5 kg/L (100 °C) ละลายในแอลกอฮอล์ 15.2 g/L ไม่ละลายในอะซิโตนและอีเทอร์
Cadmium nitrate ($Cd(NO_3)_2$)	236.43	เป็นผลึกรูปเข็มสีขาว	-	350	-	ละลายในน้ำ 1.09 kg/L (0 °C) และ 3.26 kg/L (60 °C) ละลายในอีเทอร์และอะซิโตน
Cadmium sulfide (CdS)	144.48	เป็นผลึกสีเหลืองส้ม	4.82	1750 (ที่ 100 atm)	-	ละลายในน้ำ 1.3 mg/L และจะแขวนลอยอยู่ในน้ำร้อน ละลายได้เล็กน้อย NH_4OH ละลายในกรด
Cadmium acetate ($Cd(C_2H_2O_2)_2$)	230.5	ผลึกมีไม่มีสี มีกลิ่นคล้ายน้ำสมสายชู	2.341	256	Dec[1/]	ละลายได้ดีในน้ำ

URU ithesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

ตารางที่ 1 (ต่อ)

สาร (สูตรทางเคมี)	น้ำหนักอะตอมหรือโมเลกุล	สถานภาพ	ความถ่วงจำเพาะ	จุดหลอมละลาย	จุดเดือด	การละลาย
Cadmium amide ($Cd(NH_2)_2$)	144.46	ของแข็งสีขาว	3.05 (ที่ 35 °C)	120 (Dec[1/])	-	-
Cadmium ammonium bromide ($CdBr_2.4NH_4Br$)	664.0	ผลึกไม่มีสี	-	-	-	-
Cadmium arsenide (Cd_2As_2)	487.05	ผลึกสีเหลี่ยมสีเทา	6.21	721	-	-
Cadmium azide ($Cd(N_2)_2$)	196.5	-	-	-	-	-
Cadmium benzoate ($Cd(C_7H_5O_2)2.2H_2O$)	390.66	ของแข็งสีขาว	-	-	-	-
Cadmium borotungstate ($Cd_5(BW_{12}O_{40})_2.18H_2O$)	6602.06	ผลึกสีเหลือง	-	75	-	-
Cadmium bromate ($Cd(BrO_2)_2.H_2O$)	386.26	ผลึกสีขาว	3.758	Dec[1/]	-	-
Cadmium bromide ($CdBr_2$)	272.24	ผลึกสีเหลือง	5.129 (25 °C)	567	862	-

323307754 2 URU ithesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 1 (ต่อ)

สาร (สูตรทางเคมี)	น้ำหนักอะตอมหรือโมเลกุล	สถานภาพ	ความถ่วงจำเพาะ	จุดหลอมละลาย	จุดเดือด	การละลาย
Cadmium carbonate ($CdCO_2$)	172.42	ผลึกสีขาว	4.258 ($4\ ^{\circ}C$)	< 500 Dec[1/]	-	-
Cadmium chlorate ($Cd(ClO_2)_2.2H_2O$)	315.36	ผลึกไม่มีสี	2.28 ($18\ ^{\circ}C$)	80	-	-
Cadmium cyanide ($Cd(CN)_2$)	164.45	ผลึก	2.226	>200	-	-
Cadmium drihydrogen phosphate($Cd(H_2PO_4)_2.2H_2O$)	342.4	ผลึกรูปสามเหลี่ยม	2.74	100 Dec[1/]	-	-
Cadmium fluogallate ($Cd(H_2O_4)_6)(GaF_5H_2O$)	-	ผลึกไม่มีสี	2.79	110	-	-
Cadmium fluoride (CdF_2)	150.41	ผลึกสีเหลี่ยมสีขาว	6.64	1100	1758	-
Cadmium fluosilicate ($CdSiF_6.6H_2O$)	-	ผลึกหกเหลี่ยมไม่มีสี	-	-	-	-
Cadmium formate ($Cd(CHO_2)_2.2H_2O$)	238.48	ผลึก	2.44	Dec[1/]	-	-

323307754 2 URU ithesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 1 (ต่อ)

สาร (สูตรทางเคมี)	น้ำหนักอะตอมหรือโมเลกุล	สถานภาพ	ความถ่วงจำเพาะ	จุดหลอมละลาย	จุดเดือด	การละลาย
Cadmium fumarate ($CdC_4H_2O_4$)	226.47	ของแข็ง	-	-	-	-
Cadmium hexamine chlorate ($Cd(NH_2)_6(ClO_2)_2$)	381.4	-	-	-	-	-
Cadmium hexamine perchlorate ($Cd(NH_2)_6(ClO_4)_2$)	403	-	-	-	-	-
Cadmium hydroxide arsenate ($CaHAsO_4H_2O$)	270.34	ของแข็ง	4.164	-	-	-
Cadmium hydroxide ($Cd(OH)_2$)	146.43	ผลึกสีขาว	4.79 (15 °C)	300 Dec[1/]	-	ไม่ละลายน้ำ
Cadmium iodate($Cd(IO_2)_2$)	462.25	ผลึกสีขาว	6.43	Dec[1/]	-	-
Cadmium iodide (CdI_2)	366.25	ผลึกหกเหลี่ยมสีน้ำตาลอ่อน	5.67 (30 °C)	385	769	-

323307754 2 URU ithesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 1 (ต่อ)

สาร (สูตรทางเคมี)	น้ำหนักอะตอมหรือโมเลกุล	สถานภาพ	ความถ่วงจำเพาะ	จุดหลอมละลาย	จุดเดือด	การละลาย
Cadmium lactate ($Cd(C_3H_5O_2)_2$)	280.56	ผลึกรูปเข็ม	-	-	-	-
Cadmium maleate ($CdC_4H_2O_4.2H_2O$)	262.5	ของแข็ง	-	-	-	-
Cadmium molydate ($CdMoO_4$)	272.36	ของแข็ง	5.347	-	-	-
Cadmium nitride (Cd_2N_2)	365.2	-	-	-	-	-
Cadmium nitrocobaltate (Cadmium cobaltintrite; $Cd_2(Co(NO_2)_6)_2$)	1007.21	ผลึกสีเหลือง	175 Dec[1/]	-	-	-
Cadmium oxalate (CdC_2O_4)	200.43	ผลึกไม่มีสี	3.32 (18/4°C)	340 Dec[1/]	-	-
Cadmium perchlorate ($Cd(ClO_4)_2.6H_2O$)	419.9	ผลึก	-	129.4	-	-

323307754 2 URU ithesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 1 (ต่อ)

สาร (สูตรทางเคมี)	น้ำหนักอะตอมหรือโมเลกุล	สถานภาพ	ความถ่วงจำเพาะ	จุดหลอมละลาย	จุดเดือด	การละลาย
Cadmium permanganate ($Cd(MnO_4)_2.6H_2O$)	458.4	ผลึกสีม่วง	2.18	95 Dec[1/]	-	-
Cadmium phosphate ($Cd_2(PO_4)_2$)	527.19	ผลึกไม่มีสี	-	1500	-	-
Cadmium picrate ($Cd(C_2H_2(NO_2)_2OH)_2$)	-	ของแข็งสีเหลือง	-	-	-	-
Cadmium potassium cyanide ($Cd(CN)_2.2KCN$)	294.67	ผลึกสี่เหลี่ยม	-	-	-	ละลายได้ในน้ำเย็นและน้ำร้อน ไม่ละลายในแอลกอฮอล์
Cadmium ricinoleate ($Cd(C_{10}H_{22}O_2)_2$)	706.5	ผงละเอียดสีขาว	1.11 (25 °C)	103	-	-
Cadmium salicylate ($Cd(C_7H_5O_2)_2.H_2O$)	404.65	ผลึกรูปเข็มสีขาว	-	-	-	-
Cadmium selenate, dehydrate ($CdSeO_4.2H_2O$)	291.40	ผลึก	3.623	100	-	-

323307754 2 URU ithesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 1 (ต่อ)

สาร (สูตรทางเคมี)	น้ำหนักอะตอมหรือโมเลกุล	สถานภาพ	ความถ่วงจำเพาะ	จุดหลอมละลาย	จุดเดือด	การละลาย
Cadmium selenide (CdSe)	191.37	ผลึกสีแดงหรือสีเทาจนถึงน้ำตาล	5.81 (15/4 °C)	>1350	-	-
Cadmium-m-silicate ($CdSiO_3$)	188.74	ผลึกไม่มีสี	4.93	1242	-	-
Cadmium succinate ($C_4H_6O_4.Cd$)	230.5	-	-	-	-	-
Cadmium sulfate ($CdSO_4$)	208.5	ผลึกสีขาว	4.691	1000	-	-
Cadmium sulfate tetrahydate ($CdSO_4.4H_2O$)	280.5	-	-	-	-	-
Cadmium sulfite ($CdSO_3$)	192.48	ผลึก	-	Dec[1/]	-	-
Cadmium tartrate ($CdC_4H_4O_6$)	260.48	ผงสีขาว	-	-	-	-
Cadmium telluride (CdTe)	240.0	ผลึกสีเหลี่ยมสีดำ	6.20 (15 °C)	1041	-	-

323307754 2 URU ithesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 1 (ต่อ)

สาร (สูตรทางเคมี)	น้ำหนักอะตอมหรือโมเลกุล	สถานภาพ	ความถ่วงจำเพาะ	จุดหลอมละลาย	จุดเดือด	การละลาย
Cadmium trichloroacetate ($Cd(C_2Cl_3O_3)_2.1\ 1/2H_2O$)	464.22	ผลึก	2.093 ($25\ ^{\circ}C$)	-	-	-
Cadmium trihydrazine chlorite ($Cd(N_2H_2)_2(ClO_2)_2$)	375.7	-	-	-	-	-
Cadmium trihtdrazine perchlorate ($Cd(N_2H_2)_2(ClO_4)_2$)	407.5	-	-	-	-	-
Cadmium tungstate ($CdWO_4$)	360.3	ผลึกสีเหลือง	-	-	-	-

DEC[1/] = Decomposition Point หมายถึงอุณหภูมิที่ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบ นอกเหนือจากการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของเหลว

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ, 2541, น.11-19

การนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์

แคดเมียมมีสมบัติที่ดีหลายอย่าง จึงมีการนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม ในด้านอุตสาหกรรมแคดเมียมและเกลือแคดเมียมจำนวนมากถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า นำมาผสมกับโลหะอื่น เช่น อลูมิเนียม ปรอท แมกนีเซียม นิเกิล ทำเป็นโลหะผสม เช่น อัลลอยด์ ซึ่งนำไปทำเป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เครื่องป้องกันไฟ เบ้าหลอมส่วนประกอบรถยนต์ นอกจากนี้ยังใช้ทำเป็นแบตเตอรี่ นิเกิล-แคดเมียม (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2532, น.1) เช่น ในแถบตะวันตกของโลก ในปี 1990 มีการใช้ Ni-Cd Batteries ถึง 9,100 ตันแคดเมียมต่อปี โดยใช้ในการผสมในการผลิตยางรถยนต์เพื่อให้ทนความร้อน และทำหน้าที่เป็น Stabilizer ในอุตสาหกรรมพลาสติก ใช้ในอุตสาหกรรมสี เช่น สีทาบ้าน สีชุบโลหะ หมึกพิมพ์ สีทำแก้วกระดาษ สิ่งทอ เป็นต้น ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำสำหรับอุปกรณ์เซลล์สุริยะ (Solar Cell) และใช้ในงานทางด้านการแพทย์และทันตแพทย์ ด้านเกษตรกรรมแคดเมียมถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารฆ่าวัชพืช (Herbicides) สารฆ่าเชื้อรา (Fungicides) และปุ๋ยฟอสเฟตที่มีวัตถุดิบมีการปนเปื้อน (BEL, 2002, p.52) จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แคดเมียมเข้ามามีบทบาทมากในสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศน์และมนุษย์

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

แคดเมียมเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ประเภท Procaryotic เช่น แอกทิโนไมซีต นอกจากนั้นแคดเมียมยังทำให้ราก ต้น น้ำหนักปม และผลผลิตของถั่วเหลืองลดลง โดยทำให้เกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหารของถั่งเหลือง โดยเฉพาะอย่างยิ่งทำให้ปริมาณเหล็กและแมงกานีสในถั่วเหลืองลดลง อีกทั้งยังทำให้การตรึงไนโตรเจนลดลง ซึ่งแคดเมียมเป็นอันตรายต่อสัตว์ได้มาก เพราะพืชที่สะสมแคดเมียมไม่แสดงอาการเป็นพิษ ซึ่งเมื่อเข้าสู่ร่างกาย แคดเมียมจะยับยั้งการทำงานของระบบเอนไซม์โดยก่อกวนการทำงานของเอนไซน์ที่มีโลหะเป็นส่วนประกอบ (Metalloproteinase, Metallo-enzyme) และ ฟอสโฟลิปิด (Phospholipids) (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540 น.145; สุกาญจน์ รัตนเลิศนุสรณ์, 2550, น.265)

ผลกระทบต่อมนุษย์

ในธรรมชาติแคดเมียมเป็นสารเจือปนในแร่สังกะสี (อาจมากถึง 3 %) เช่น สินแร่สฟาเลอไรด์หรือคาลาไมน์ผู้ที่ได้รับแคดเมียมมากเกินไป เช่น การดื่มน้ำที่มีแคดเมียมเจือปนตั้งแต่ 15 mg/kg จะเกิดภาวะปัสสาวะมีโปรตีน เนื่องจากมีโปรตีนยูเรียในไตสูง อันเนื่องมาจากท่อไตชำรุดและไตบาดเจ็บ ในผู้หญิงสูงอายุจะมีการเปลี่ยนแปลงของกระดูกผิดปกติ หรือที่เรียกว่าโรค “อีไต-อีไต” ผู้เป็นโรคเรื้อรังจากแคดเมียมจะเป็นโรคทางเดินหายใจ โรคหัวใจ และความดันโลหิตสูง นอกจากนั้นแคดเมียมยังเป็นสารก่อมะเร็ง โดยทำให้เกิดมะเร็งในเนื้อเยื่อที่อยู่ลึก เช่น กล้ามเนื้อและกระดูกในหนู

323307754 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ทดลอง แต่สำหรับมนุษย์อวัยวะที่เป็นอันตรายที่สำคัญมีสองส่วน คือ เมื่อได้รับแคดเมียมระยะสั้นจะมีผลกระทบต่อระบบการย่อยอาหารหากกินเข้าไป และต่อระบบปอดภายหลังการสูดดม เมื่อได้รับแคดเมียมในระยะยาวจะมีผลต่อไต โดยที่ครึ่งชีวิตทางชีวภาพ (Biological Half Life) ของแคดเมียมประมาณ 18 ปี จากการศึกษาที่ญี่ปุ่นพบว่า หากได้รับแคดเมียมทางปากทุกวันเท่ากับ 200 µg จะเป็นอันตรายต่อไตผู้สูงอายุตั้งแต่ 50 ปีขึ้นไป ในสหรัฐอเมริกาและแคนนาดาประเมินกันว่าคนจะบริโภคแคดเมียมจากอาหารทุกวันในปริมาณ 50-80 µg (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540, น.145; สุกาญจน์ รัตนเลิศนุสรณ์, 2550, น.259)

ปริมาณในดินและพืช

ปริมาณแคดเมียมในดินโดยทั่วไปมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.07-1.0 mg/kg และค่าเฉลี่ยโดยรวมของดินทั่วไปมีค่า 0.53 mg/kg สำหรับดินที่มีการปนเปื้อน แหล่งปนเอนที่สำคัญคือ การถลุงแร่ กากตะกอนน้ำโสโครก และปุ๋ย ผลการทดลองของสถานีทดลองโรแทมสเตด (Rothamsted Experiment Station) พบว่าการให้ปุ๋ยฟอสเฟตหรือปุ๋ยคอกเป็นเวลา 140 ปี ทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมที่เพิ่มจากเดิมที่มีอยู่ 0.51 mg/kg เป็น 0.77 mg/kg

ปริมาณแคดเมียมทั่วไปในพืชมีค่าต่ำ จะมีค่าสูงในพืชบางชนิดเช่น ในใบผักโขม (Spinach) ในปริมาณ 0.11 mg/kg (น้ำหนักสด) พืชกินใบหรือพืชหัวบางชนิดจึงเป็นตัวนำแคดเมียมมาสู่มนุษย์ เมื่อมิการปนเปื้อนแคดเมียมจะสะสมในรากมากที่สุด สะสมในใบรองลงมา และมีการเคลื่อนย้ายสู่เมล็ดได้น้อย (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540, น.259)

ตารางที่ 2 ปริมาณแคดเมียมในพืช (mg/kg)

ชนิดพืช	ส่วนพืช	ค่าเฉลี่ย
ข้าว	เมล็ด	0.01 - 0.1
ข้าวสาลี	เมล็ด	0.01 - 0.26
ข้าวบาร์เลย์	เมล็ด	0.01 - 0.04
ถัวเหลือง	เมล็ด	0.29
ถั่วโคลเวอร์	เหนือดิน	0.02 - 0.35
หญ้า	ใบ	0.03 - 1.25
ข้าวโพดหวาน	เมล็ด	0.06 - 0.1
กะหล่ำปลี	ใบ	0.05
ผักกาดหอม	ใบ	0.12 - 0.66
หมอหัวใหญ่	หัว	0.08

3233077542 URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ชนิดพืช	ส่วนพืช	ค่าเฉลี่ย
มันฝรั่ง	หัว	0.03
มะเขือเทศ	ผล	0.03 - 0.23

ที่มา : ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540, น.262

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ลักษณะการแพร่กระจายและการปนเปื้อน

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (2540, น.261-263) ได้กล่าวถึงลักษณะการแพร่กระจายและการปนเปื้อนของแคดเมียมไว้ว่า การปนเปื้อนแคดเมียมในดินมีสาเหตุมาจากแหล่งปนเปื้อนที่สำคัญ 3 แหล่ง คือ

1. เหมืองแร่ตะกั่วและสังกะสี
2. ตะกอนน้ำโสโครก
3. ปุ๋ย โดยเฉพาะอย่างยิ่งปุ๋ยฟอสเฟตและปุ๋ยคอก

แคดเมียมมีลักษณะคล้ายสังกะสีหลายประการ เช่น ถูกพืชดูดกินได้ง่าย มีสมบัติทางเคมีและโครงสร้างแบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่คล้ายคลึงกัน และจะพบแคดเมียมปนในสินแร่สังกะสีเสมอ ที่แตกต่างจากสังกะสีก็คือ แคดเมียมเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตสูงมากโดยเข้าไปแย่งบทบาทของสังกะสีในกระบวนการชีวเคมีในร่างกายของสิ่งมีชีวิต

เนื่องจากสามารถละลายได้ดีในดิน ดังนั้น แคดเมียมปริมาณน้อยที่ปนเปื้อนในดินก็จะถูกดูดกินและสะสมไว้ในพืชซึ่งโดยสภาพความเข้มข้นปกติ พืชจะมีแคดเมียมในมวลแห้งน้อยกว่า 1 mg/kgแต่ถึงแม้จะมีแคดเมียมในพืชสูงมาก พืชก็ปราศจากอาการเป็นพิษของแคดเมียม ซึ่งนับเป็นอันตรายอย่างมาก เพราะพืชเป็นพื้นฐานของโซ่อาหารของคนและสัตว์กินพืช อย่างไรก็ตามก็มักจะถือว่าแคดเมียมที่สกัดได้โดยกรดแอเซติก 20 mg/kg เป็นระดับที่พืชแสดงอาการเป็นพิษ เช่น ผักกาดหอม แต่ก็มีพืชที่ทนต่อ แคดเมียมได้ถึง 50 mg/kg และในหลายกรณีทนได้ถึง 200 mg/kg จึงนับเป็นเรื่องที่ต้องระมัดระวัง เพราะในสภาพธรรมชาติทั่วไป ถ้าแคดเมียมเกิน 0.15 mg/kg ก็นับเป็นระดับสูงแล้ว

แคดเมียมเจือปนอยู่ในกากตะกอนน้ำโสโครกเสมอ บางครั้งอาจปนสูงถึง 100 mg/kg เนื่องจากของเสียนี้มีศักยภาพในการใช้เป็นปุ๋ยได้สูง การใช้กากตะกอนในการเกษตร จึงเป็นการนำแคดเมียมเข้าสู่วงจรอาหารอีกทางหนึ่ง โดยที่พืชแต่ละชนิดจะสะสมแคดเมียมในปริมาณที่ต่างกัน ส่วนที่สะสมแคดเมียมได้ดีก็คือส่วนใบ แม้พืชกินใบ เช่น ผักกาดหอมต่างสายพันธุ์ ก็ยังสะสมแคดเมียมได้ในปริมาณที่ต่างกัน

อย่างไรก็ตามการเลือกปลูกพืชในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม เป็นเรื่องที่ผู้บริโภคยอมรับได้ยาก อีกประการหนึ่งการเลี่ยงโดยการปลูกพืช เลี้ยงสัตว์ในบริเวณดังกล่าว สัตว์หลีกเลี่ยงการบริโภคไม่ได้ จึงเท่ากับเป็นการนำมลพิษสู่มนุษย์โดยอ้อม ดังนั้น จึงน่าจะมีการกำหนดค่ามาตรฐานในของเหลือที่มีแคดเมียมเจือปนอยู่

แคดเมียมในดินถูกดูดซับโดยอนุภาคดินเหนียว ออกไซด์ของเหล็กและอลูมินัม และกรดฮิวมิก ซึ่งการดูดซับโดยอนุภาคดินเหนียวนั้นเนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมีประจุในการดูดซับ

แหล่งกำเนิดของการปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

การปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม มี 2 เส้นทางหลัก ๆ คือ

1. จากธรรมชาติ เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ ซึ่งปลดปล่อยละอองไอจำนวนมากสู่บรรยากาศ ตลอดจนการเซาะของฝนจนเกิดการพังทลายของหินต้นกำเนิด

2. แหล่งกำเนิดแคดเมียมจากการกระทำของมนุษย์ ซึ่งมักก่อให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมในปริมาณมากกว่าจากธรรมชาติ มักมาจากการถลุงแร่ อุตสาหกรรมการหลอม และเผาโลหะ อุตสาหกรรมแก้ว พลาสติก ปุ๋ย ซึ่งจะทำให้เกิดการปนเปื้อนในดิน แหล่งน้ำ น้ำทะเล และบรรยากาศในระดับสูง (Krishan Murti C.R, 1987, p.55) มักจะพบแคดเมียมจากตะกอนบำบัดน้ำทิ้ง บางครั้งมีปริมาณสูงถึง 100 mg/kgในน้ำหนักแห้งซึ่งตะกอนเหล่านี้จะนำไปสู่การปนเปื้อนในดินที่ใช้ในการเกษตรได้ (Purves, 1977, p.30) แคดเมียมสามารถสามารถเคลื่อนย้ายสู่ดิน บรรยากาศและลงสู่แหล่งน้ำ เมื่อคนและสัตว์บริโภคพืชหรือดื่มน้ำจะได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายไปสะสมไว้และสามารถถ่ายทอด สะสม และเพิ่มขึ้นได้ในระบบโซ่อาหาร คนที่ได้รับแคดเมียมจากการทำงานโดยการสูดเอาไอระเหยของแคดเมียมซึ่งส่วนใหญ่มาจากการทำเหมืองและการหลอมโลหะและการสูดควันบุหรี่ รวมถึงการรับเข้าสู่ร่างกายโดยการกินอาหารและน้ำดื่มที่มีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ซึ่งแหล่งกำเนิดแคดเมียมที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์หลัก ๆ สามารถจำแนกได้ดังนี้

1. จากอุตสาหกรรมตะกั่วและสังกะสี (การทำเหมือง การหลอมและถลุง) ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้จะปล่อยฝุ่นไอ (Fume) น้ำเสีย กากตะกอน (Sludge) ที่มีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ออกมา

2. โรงงานชุบโลหะแคดเมียม ซึ่งของเสียจากโรงงานประเภทนี้จะมีแคดเมียมประมาณ 100-500 mg/kg และมีโลหะหนักอื่น ๆ รวมทั้งไซยาไนด์และสารเคมีอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย

3. แคดเมียมถกนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดเพื่อเป็นตัวเคลือบผิวโลหะอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น เหล็ก และเหล็กล้า เพราะแคดเมียมสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดีมากและยังทนทานต่อการกร่อนโดยสารละลายเบสได้ด้วย ดังนั้นพวกอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้านี้จะปล่อยฝุ่น ไอ น้ำเสีย กากตะกอน ที่มีแคดเมียมปนอยู่ออกมา

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

4. จากการเผาของเสีย (Incineration) การเผาของเสียที่มีแคดเมียมประกอบอยู่เช่น พลาสติก เม็ดสี โลหะเคลือบ เศษเหล็ก เป็นต้น จะปล่อยแคดเมียมออกมาในรูป Cadmium Aerosols เช่น Cadmium Oxide (CdO)

5. จากยางรถที่สึกหรอ ยางรถยนต์จะมีแคดเมียมประกอบอยู่ประมาณ 20-90 mg/kg โดยเป็นสิ่งเจือปน (Impurity) ใน Zinc Oxide ซึ่งเป็นสารรักษาความเร่ง และการสึกหรอจากการเสียดสีทำให้แคดเมียมปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่ง

6. จากปุ๋ยฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟตมีแคดเมียมปนอยู่เนื่องจากหินฟอสเฟตเป็นวัตถุดิบมีแคดเมียมประมาณ 2-170 mg/kg มีรายงานการศึกษาพบว่าการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตจะไปเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดิน เพราะแคดเมียมฟอสเฟต (Cadmium Phosphate) ละลายน้ำได้น้อย และส่วนที่ไม่ละลายพืชไม่สามารถดูดซึมได้ ดังนั้นแคดเมียมส่วนนี้จึงสะสมอยู่ในดิน แต่ถ้ามีการใช้ปุ๋ยแอมโมเนียร่วมด้วย แคดเมียมจะละลายได้มากขึ้นเนื่องจากแคดเมียมจะไปรวมตัวกับแอมโมเนียเป็นไอออนที่ละลายน้ำได้ คือ $Cd(NH_3)_2^{2+}$ และ $Cd(NH_3)_4^{2+}$

7. จากการใช้ถ่านหินและ heating oil แคดเมียมเป็นธาตุปริมาณน้อยในเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil Fuels) ดังนั้นเมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงเหล่านี้ แคดเมียมจะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของไอและเถ้า ปริมาณแคดเมียมในถ่านหินอยู่ในช่วง 0.25-5 mg/kg ถึงแม้จะไม่ทราบเปอร์เซ็นต์ที่แน่นอนของแคดเมียมที่ถูกปล่อยออกจากปล่อง หรือส่วนที่ถูกขจัดโดย Scrubber หรือส่วนที่ถูกทำให้ตกตะกอน (Precipitated) ก็ตามแต่พบว่า ในเถ้าจากถ่านหิน (Coal Ash) มีปริมาณแคดเมียมสูงถึง 150 mg/kg ส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมโดยเฉลี่ยใน Heating Oil โดยประมาณ 0.3 mg/kg และจากการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศจีนได้ทำให้เกิดมลพิษแคดเมียม 312-315 mg/kg (Liao H.C Jiang S.J, 1999, p.1240)

8. จากการตกตะกอนของน้ำทิ้ง (Sewage Sludge) หรือที่เรียกว่ากากตะกอนน้ำเสีย ได้จากโรงงานกำจัดของเสียจะมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก โดยเฉพาะแคดเมียมในปริมาณความเข้มข้นที่ปริมาณค่อนข้างสูง ปริมาณแคดเมียมในกากตะกอนจากโรงงานกำจัดน้ำเสีย จำนวน 56 แห่งในประเทศสวีเดน มีค่าเฉลี่ย 15.5 mg/kgและการใช้เหล่านี้เพื่อเป็นปุ๋ยอินทรีย์ เป็นแหล่งที่ให้ธาตุอาหารพืช จะเป็นการเพิ่มปริมาณแคดเมียม ในดิน ได้มีการคำนวณว่าจากการใช้กากตะกอนน้ำเสีย (ที่มีแคดเมียมประมาณ 20 mg/kg หรือมากกว่า) จำนวน 2-3 ตันต่อปี ใส่ลงในพื้นที่เพาะปลูกที่ยังไม่มีปัญหามลพิษ (Unpolluted Agriculture Soils ซึ่งมี Cd < 0.1-0.5 mg/kg) จะไปเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดินเพาะปลูกเป็น 1.2-6 mg/kg และพบว่าพืชบางชนิด เช่น ข้าว ข้าวสาลี สามารถดูดซึมแคดเมียมจากดินได้ดี

9. จากการสึกกร่อนของสังกะสี (Corrosion Zinc) แคดเมียมเป็นสิ่งเจือปนในสังกะสี เมื่อโลหะหรือภาชนะที่ชุบสังกะสีเกิดการสึกกร่อนแคดเมียมก็จะแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

10. ยาสูบ (Tobacco) เป็นพืชที่สามารถดึงดูดแคดเมียมที่มีอยู่ในดินและแคดเมียมจะถูกสะสมไว้มากบริเวณใบยาสูบ ซึ่ง (ปรีชา บุณจง, วิภาวี เสาหิน, ธีรวุฒ แลหะ, ปกาศิต การกระสัง และสุรินทร์ เยาว์ด้วง, 2550, น.56) ได้ศึกษาปริมาณแคดเมียมในผลิตภัณฑ์ยาสูบพบแคดเมียมในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยาสูบ จำนวน 13 ตัวอย่าง คลอบคลุมทั้งบุหรี่ชนิดซองที่ผลิตขึ้นในประเทศและที่ผลิตในต่างประเทศรวมถึงยาสูบพื้นเมือง มีปริมาณแคดเมียมอยู่ในช่วง 1.05-1.82 µg เนื่องจากยาสูบเป็นพืชที่สามารถดูดซับแคดเมียมได้เป็นอย่างดี นอกจากนั้นการสูบบุหรี่อาจมีแคดเมียมดูดซึมเข้าสู่ร่างกายหรือออกสู่บรรยากาศ อาจจะนำมาซึ่งผลกระทบและความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งในประชาชนที่สูบบุหรี่ได้ (Lugon-Moulin, 2004) และจากการสูบบุหรี่พบว่าจะทำให้แคดเมียมออกสู่บรรยากาศ 1.4 µg/บุหรี่ 1 มวน (กรมควบคุมมลพิษ, 2541, น.29)

การปนเปื้อนแคดเมียมในดิน

แคดเมียมในหินอัคนี และหินตะกอน จะมีปริมาณไม่เกิน 0.3 mg/kg จะพบอยู่ร่วมกับสังกะสีเสมอ แต่ในสภาพดินกรดแคดเมียมจะมีสภาพเคลื่อนที่ได้ดีกว่าสังกะสี แคดเมียมมีรูปประกอบได้เช่นเดียวกับกลุ่มไอออนบวก Zn^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Fe^{2+}, Mg^{2+} ปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการควบคุมสภาพการเคลื่อนที่ได้ของแคดเมียมในดิน ด้วยค่า pH ของดินและค่ารีดอกซ์ ซึ่งดินที่มีศักดิ์รีดอกซ์สูงแคดเมียมจะอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ (CdO) หรือสารประกอบแคดเมียมคาร์บอเนต ($CdCO_3$) หรืออาจอยู่ร่วมกับฟอสเฟตได้เช่นกัน แคดเมียมเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่า pH 4.4 ถึง 5.5 (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540, น.259) ขณะที่ดินสภาพเป็นด่างแคดเมียมจะไม้ค่อยเคลื่อนที่ ซึ่งในสภาพดินเป็นกรด การละลายได้ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็ก อะลูมีเนียมและปริมาณอินทรียวัตถุในดิน นอกจากนั้นแคดเมียมในดินจะอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ และในรูปสารประกอบที่สลับซับซ้อนกับฮิวมัส จากการใช้วิธีวิเคราะห์ของ (McLaren, 1998, p.332) พบว่าประมาณครึ่งหนึ่งของแคดเมียมจะอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ และที่เหลืออีกครึ่งหนึ่งจะดูดยึดอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและอลูมีเนียมและอินทรียวัตถุในดิน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดินและค่าศักดิ์รีดอกซ์ของดินจะมีผลต่อการละลายได้และการแพร่กระจายของแคดเมียมเป็นอย่างมาก นอกจากนั้น Rana (2006, p.56) ได้กล่าวไว้ว่ากากตะกอนดินในหลุมฝังกลบขยะมูลฝอยโดยทั่วไปจะมีแคดเมียมปนเปื้อน และแคดเมียมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปคาร์บอเนตและรูปไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคดเมียมจะสามารถเปลี่ยนรูปออกมาในรูปสารละลายและปนเปื้อนลงสู่น้ำใต้ดิน เมื่อค่า pH ของดินบริเวณนั้นเป็นกรด แคดเมียมโดยส่วยใหญ่จะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ ทำให้ศักยภาพในการเคลื่อนที่และแพร่กระจายของแคดเมียมสูงมากเมื่อเทียบกับโลหะอื่น ซึ่งสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ Cd>Zn>Cu>Ni (Hickey M.G. J.A. Kittrick, 1984, p.372) ดินโดยทั่วไปจะมีโลหะหนักปะปนอยู่ ซึ่งเป็นผลมาจาก

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

การพุพังสลายตัวของวัตถุต้นกำเนิด โลหะหนักส่วนใหญ่จะมีการเคลื่อนที่ได้น้อย เนื่องจากมีความสามารถยึดเกาะอยู่กับส่วนที่เป็นรูปที่แลกเปลี่ยนได้ดี ดังนั้นจึงมีโลหะหนักที่อยู่ในรูปสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (Available Form) ในรูปสารละลายในดินในดินเหนียวได้น้อยกกว่าในดินทราย ซึ่งมีส่วนที่มีปริมาณดินเหนียวน้อย เนื่องจากดินเหนียวมีพื้นที่ผิวจำนวนมาก และที่ผิวของดินเหนียวจะมีประจุสุทธิเป็นลบมากกว่าดินทราย ดังนั้นจึงสามารถดูดยึดพวกโลหะหนักที่มีประจุบวกได้ดีกว่า จึงเป็นกระบวนการหลักที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่และสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพของสารประกอบและสารมลพิษในดิน (วิรานุช หลาง, 2551, น.127) นอกจากนั้นการเคลื่อนย้าย (Transportation) และการคงอยู่ของธาตุโลหะหนักในดินจะขึ้นอยู่กับหลายกรณี เช่น ระดับความชื้น สภาพรีดอกซ์ การดูดซึมโดยพืช การดูดซึมโดยจุลินทรีย์ในดิน และการเคลื่อนย้ายในสภาพการละลาย และสารแขวนลอย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548, น.517; ไพบูลย์ วิวัฒนาวงศ์วนา, 2546, น.105; ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540, น.258) โดยขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

1. การเคลื่อนย้ายในสภาพละลาย (ขนาดเล็กกว่า 0.45 ไมครอน) หรือสารแขวนลอย (ขนาดใหญ่กว่า 0.45 ไมครอน) ซึ่งสภาพการละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสภาพเคลื่อนที่ได้ (Mobility) ของโลหะหนักและมีบทบาทอันสำคัญยิ่งในการกำหนดความเป็นพิษต่อพืช จุลินทรีย์ดิน และสิ่งมีชีวิตในดิน หรือมีมากจนเป็นสารพิษในดิน สภาพเคลื่อนที่ได้ของโลหะหนักในดินเป็นผลอัตราส่วนระหว่างส่วนที่ละลายได้ กับส่วนที่เป็นของแข็ง อัตราส่วนนี้ถูกกำหนดโดยอัตราการเติมของโลหะหนักสู่ดิน และปฏิกิริยากับสารอื่นในดิน สารพิษที่ละลายอยู่ในดิน และสามรถเคลื่อนย้ายได้ด้วยการแพร่ (Diffusion) การเคลื่อนไปกับการไหลของสารลายดิน โดยการไหลของมวล (Mass Flow) ซึ่งจะต้องเกี่ยวพันกับโมเลกุลของน้ำหรือสารลิแกนด์ (Ligend) อื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งลิแกนด์ที่เป็นอินทรีย์สาร ตัวอย่างเช่น กรดฟูวิก (Fulvic Acid) หรือกรดฮิวมิก (Humic Acid) (ไพบูลย์ วิวัฒนาวงศ์วนา, 2546, น. 104)

2. ค่า pH ของดิน เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดเกี่ยวพันกับการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน โดยค่า pH ของดินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พืชสามารถดูดซึมโลหะหนักได้น้อยลง เนื่องจากไอออนของโลหะหนักในรูปที่เปลี่ยนประจุได้และละลายน้ำได้จะลดลงเมื่อค่า pH ของดินเพิ่มขึ้น ตะกั่วและโครเมียมในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่พืชและจุลินทรีย์ไม่สามารถที่จะดูดซึมได้ เนื่องจากส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่มีการละลายและเคลื่อนที่ได้น้อย ขณะที่แคดเมียมสามารถเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่า pH ระหว่าง 4.5 ถึง 5.5 ขณะที่ดินที่เป็นด่างแคดเมียมไม่ค่อยเคลื่อนที่ ซึ่งในสภาพดินกรดสารละลายได้ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมและปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ไพบูลย์ วิวัฒนาวงศ์วนา, 2546, น.171; ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540, น.259)

3. สภาพศักดิ์รีดอกซ์ ที่แปรผันในดินเป็นผลมาจากกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์ดิน เมื่อดินมีการะบายอากาศได้ดี จุลินทรีย์ดินที่ใช้ออกซิเจนจะเจริญได้ดี เมื่ออัตราการหายใจมีมากกว่า

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

อัตราการแพร่กระจายของออกซิเจนบนผิวดินลงสู่ดิน ดินจะเริ่มขาดออกซิเจนซึ่งเมื่อขาดออกซิเจนแล้วกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถใช้สารอื่นแทนออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกรับวนการหายใจและเจริญเติบโตมากขึ้น เช่น การใช้ไนเตรต (NO_3^-) หรือเหล็กในรูปเฟอร์ริก (Fe^{3+}) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนเป็นต้น (จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2552, น.17)

4. ความชื้นในดิน น้ำและอากาศในดินต่างอาศัยช่องว่างในเดียวกัน เมื่อน้ำในดินเพิ่มขึ้นอากาศในดินย่อมลดปริมาณลง ซึ่งดินในบริเวณที่มีการผันแปรของน้ำในดินมาก เช่น ดินในบริเวณแหล่งน้ำที่ดินอยู่ในที่ลุ่มน้ำท่วมขังหรือดินนา เป็นต้น ความชื้นในดินเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสภาพรีดอกซ์ของดินที่สำคัญที่สุด

5. เนื้อดินที่ต่างกัน เกิดจากความแปรผันของสัดส่วนผสมของอนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวที่ต่างกัน ดินที่มีอนุภาคดินเหนียวเกิน 40 % ส่งผลให้เนื้อดินหลักเป็นประเภทดินเหนียว (Clay Soil) ขณะที่เนื้อดินหลักเป็นประเภททรายแป้ง (Silty Soil) และประเภทดินทราย (Sandy Soil) จะต้องมีสัดส่วนของกลุ่มอนุภาคทรายแป้งและอนุภาคทรายเกิน 80 % และ 90 % ตามลำดับ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548, น.63) ดินที่มีเนื้อดินที่แตกต่างกันมีผลต่อกระบวนการทางเคมีและกายภาพที่มีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อกระบวนการดูดยึดโลหะหนักในดินได้ต่างกัน

อนุภาคดินที่มีบทบาทในการในการดูดยึดสารไอออนในสารละลายดิน คือ อนุภาคดินเหนียว เป็นส่วนของอนินทรียสารที่มีรูปร่างแบบบาง ที่ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวเป็นส่วนใหญ่ และมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวมีประจุลบ ซึ่งเกิดจากการแตกหักของผลึกหรือการแทนที่กันของธาตุบางตัว ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างภายในผลึกที่ประกอบเป็นอนุภาคดินเหนียว จึงทำให้อนุภาคเหล่านี้ดูดยึดไอออนที่มีประจุบวกไว้ที่ผิวของมัน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548, น.64)

ในกระบวนการดูดยึดธาตุในสารละลายดินจะถูกยึดได้ไม่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น ไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) จะถูกดูยึดได้ดีกว่าแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ถึง 2-3 เท่า ทั้งนี้เพราะเมื่อเปียกขนาดของตะกั่วไอออน (Pb^{2+}) นั้นเล็กกว่าแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ดังนั้นโอกาสที่ Pb^{2+} จะถูกดูดยึดและตรึงในหลืบแผ่นคอลลอยด์ดินเหนียวจึงมีได้มากกว่า นอกจากนั้นความสามารถในการดูดยึดธาตุประจุบวกของดินยังขึ้นอยู่กับค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของดินด้วย โดยความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกจะมากหรือน้อยขึ้นกับปริมารดินเหนียว และปริมาณอินทรียวัตถุในดินเป็นสำคัญ ไอออนบวกที่ยึดติดที่ยึดเหนี่ยวอยู่ที่พื้นที่ผิวของอนุภาคดินด้วยแรงที่เหนียวแน่นพอสมควร และทนทานต่อการชะล้างของน้ำ (Leaching) แต่ก็สามารถถูกไล่ที่ (Replaced) ให้หลุดจากพื้นที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวได้ โดยไอออนบวกชนิดหนึ่งที่อยู่ในรูปอิสระในสารละลายดิน หรือเรียกว่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2552, น.17)

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

6. ชนิดและปริมาณของสสารอินทรีย์ เมื่อปริมาณอินทรียวัตถุสูงจะส่งผลให้พืชดูดซับโลหะหนักน้อยลงเนื่องจากอินทรียวัตถุจะจับโลหะหนักไว้ ทำให้โลหะหนักสะสมอยู่ในอินทรียวัตถุ (David B. Kim D. Peter V, 2008, p.165) ซึ่งธาตุที่มีประจุบวกอาจทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ประเภทต่าง ๆ เช่น ฮิวมัส โปรตีน กรดอะมิโน และกรดอินทรีย์อื่น ๆ กลายเป็นสารประกอบที่สลับซับซ้อมที่เรียกว่า Complexes Compound หรือ Organic Complex ซึ่งเกิดขึ้นด้วยกระบวนการที่แตกต่างกัน การดูดยึดเกิดขึ้นโดยการดึงดูดโดยไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น ไอออน – ไอออน การดึงดูดแวนเดอร์วาล พันธะไฮโดรเจน พันธออดิเนต เช่น การแลกเปลี่ยนลิแกนด์หรือพันธะทางเคมีอื่น ๆ สารที่สลับซับซ้อนมีหลายชนิดทั้งที่ละลายอยู่ในน้ำอย่างอิสระและที่เกาะเกี่ยวอยู่กับอนุภาคดินเหนียว ปกติพวกที่โมเลกุลเล็กจะละลายน้ำไม่ตกตะกอนง่ายและจะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ง่าย และในทางกลับกันก็เป็นพวกที่จะถูกพัดพาไปหรือถูกชะล้างไปได้ง่ายอีกด้วย พวกที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นไปอีกอาจมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะซึมผ่านผนังเซลล์ของรากพืชเข้าไปได้แม้ว่าจะละลายอยู่อย่างอิสระในน้ำในดินได้ แต่จะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้น้อยลงเพราะ ความเป็นประโยชน์ต่อพืชของสารประกอบ (Complex) พวกที่มีโมเลกุลใหญ่นี้จะขึ้นอยู่กับความคงทนต่อการสลายตัวของมัน เมื่อเทียบกับอำนาจการแลกเปลี่ยนประจุของราก สารที่มีความคงทนต่อการสลายตัวสูงมากจะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้น้อยกว่าสารที่มีความคงทนต่ำกว่า

อนุภาคฮิวมัส ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอินทรีย์สารของดินจะมีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวมาก มีประจุลบซึ่งสมมารถดูดซับไอออนบวกได้ดีเช่นเดียวกับอนุภาคดินเหนียว ซึ่งธาตุแต้ละชนิดมีความมีความชอบในการถูกดูดซับกับอินทรีย์สารต่างกัน เช่น ทองแดงชอบรวมกับลิแกนด์ที่เป็นสารอินทรีย์ ทองแดงจึงอาจอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุบวกหรือร่วมกับไอออนเชิงซ้อน (Anionic Complex) จึงพบทองแดงได้น้อยในดินที่มีอินทรียวัตถุสูง

7. ไอออนของธาตุอื่นที่มีอยู่ในสารละลายดิน การคงอยู่หรือการหยุดเคลื่อนที่ของธาตุโลหะหนักที่ละลายหรือแขวนลอยในระยะแรกก็คือการดูดยึดไอออนเชิงซ้อน บนพื้นที่ผิวของแข็งและการจับกับสารแขวนลอย การย่อยสลายอินทรียสารโดยจุลินทรีย์ดินช่วยให้มีการปลดปล่อยจุลธาตุเหล่านี้ออกมาแล้วอาจถูกดูดยึดด้วยอนุภาคอินทรีย์ในดิน ในระยะต่อมาธาตุโลหะหนักเหล่านี้อาจถูกดูดยึดด้วยแรงตรึงในออกไซด์ของเหล็ก แมงกานีส อะลูมิเนียม และสารอื่น ๆ ในระยะยาวอาจรวมกับแร่ที่มีความเสถียรหรือตกตะกอนในรูปค่อนข้างเสถียร เช่น เกิดเป็นรูปซิลิเกตต่าง ๆ

8. รูปของธาตุโลหะหนักในดิน ธาตุโลหะหนักในรูปที่ละลายในสารละลายดินและรูปที่ถูกดูดยึดในตำแหน่งผิวอนุภาคคลอลอยด์ดินถือเป็นรูปที่เคลื่อนที่ได้ (Immobile) ในดิน สามารถถูกพืชนำไปใช้ได้ ส่วนรูปที่ถูกตรึงและจับกับสารแขวนลอยอื่นหรือแร่ธาตุในดิน รูปที่ตกตะกอนหรือเกิดการตกตะกอนกับสารอื่นและรูปที่ถูกคลุกเคล้าเข้าสู่ระบบชีวภาพเป็นสารอินทรีย์เป็นเป็นรูปที่หยุด

3233077542 URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

เคลื่อนที่ (Immobile) แต่กระบวนการในดินมีลักษณะเป็นพลวัต (Dynamic) จึงอาจมีการเปลี่ยนแปลงรูปต่าง ๆ อยู่ตลอดเวลา (จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2552, น.18)

การจัดการของเสียที่มีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบ

1. ของเสียที่เป็นของแข็ง วิธีที่ใช้ในการจัดการของเสียประเภทนี้คือ

1.1 การหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Recycling) เช่น เศษโลหะหรือเศษชิ้นส่วนของโลหะแคดเมียม หรือสารประกอบแคดเมียม โดยการคัดแยกประเภทและแยกใส่ภาชนะบรรจุพร้อมทั้งคิดฉลากระบุชนิดให้ชัดเจนเพื่อนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตใหม่

1.2 การถมที่ (Landfill) กล่าวคือ สารประกอบแคดเมียมในรูปสารละลาย ที่ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลาย จะมีลักษณะเป็นกากของแข็งซึ่งกากเหล่านี้จะถูกทำให้เป็นแท่งหรือก้อน (solidification) ก่อนนำไปฝังหรือถมในที่เหมาะสมต่อไป

2. ของเสียที่เป็นของเหลว วิธีในการบำบัดหรือกำจัดของเสียประเภทนี้ มีหลายวิธี ได้แก่

2.1 โดยใช้กระบวนการบำบัดทางกายภาพร่วมกับทางเคมี (Physicochemical Treatment Process) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง โดยที่ปริมาณแคดเมียมในน้ำทิ้งอยู่ในช่วง 0.2-2,000 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ในน้ำทิ้งโดยทั่วไป จะมีปริมาณแคดเมียมน้อยกว่า 100 มิลิกรัม/ลิตร วิธีที่สามารถใช้ในการบำบัดได้แก่ Ion Exchange, electrolysis, Electrodialysis, Cementation, absorption แต่ปัจจุบันวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ การตกตะกอนแคดเมียมด้วยด่างให้อยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ หรือในรูปของเกลือ ในกระบวนการนี้ด่างที่ใช้ในการตกตะกอนได้แก่ ปูนขาว (Lime), Caustic soda (Sodium Hydroxide) หรือ Sodium Carbonate จากนั้นปล่อยตะกอนเหล่านี้ตกลงมาด้วยน้ำหนักของตะกอนเอง นอกจากนี้ บางครั้งยังต้องใช้ระบบอื่น ๆเสริมเข้าไปอีกเช่น

ในกรณีน้ำทิ้งมีไซยาไนด์ หรือเกลือแอนโมเนียต้องกำจัดสารประกอบเหล่านี้ก่อน เนื่องจากสารประกอบเหล่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพของการตกตะกอนลดลง

น้ำใสจากการตกตะกอนทางเคมี เพื่อให้น้ำใสก่อนปล่อยทิ้งมีปริมาณแคดเมียมลด ลงอีก จึงต้องผ่านเทคนิคอื่น ๆ อีก เช่น Activated Carbon Reverse Osmosis และ Iron Exchange อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายๆเทคนิครวมกัน

สำหรับตะกอนสลัดจ์ที่ตกตะกอนลงมา ซึ่งมีปริมาณของแข็งเพียง 2-10% และแคดเมียม 10-1,000 mg/kgจะต้องทำการลดปริมาณโดยการขจัดน้ำออกไปก่อน (Dewatering Process) เช่น การกรองด้วยการใช้สุญญากาศ หรือการใช้แรงดันสูงๆ (Vacuum or high pressure Filtration) จะเหลือตะกอนที่อยู่บนแผ่นรองที่เรียกว่า Filter Cake ประมาณ 15-20% และมีของแข็ง 20-50% จากนั้นจึงนำ Filter Cake ไปกำจัดทิ้งโดยการถมที่ (Landfill)

2.2 การตกตะกอนให้อยู่ในรูปของซัลไฟด์ เนื่องจากในการขจัดโลหะหนักแต่ละชนิดออกจากน้ำทิ้งให้ได้มากที่สุด โดยการตกตะกอนให้อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ ปัจจัยสำคัญคือ pH และ

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

องค์ประกอบหรือลักษณะของน้ำทิ้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตจะมีอิทธิผลต่อการละลายของแคดเมียมไฮดรอกไซด์ (Cadmium Hydroxide) ดังนั้นทางเลือกอีกวิธีหนึ่งในการขจัดแคดเมียมออกจากน้ำทิ้งได้มากที่สุดคือ การตกตะกอน ในรูปไฮดรอกไซด์ แล้วตามด้วยการตกตะกอนแคดเมียมบางส่วนที่ยังเหลืออยู่ในน้ำทิ้งในรูปซัลไฟด์ แต่วิธีตกตะกอนให้อยู่ในรูปซัลไฟด์มีข้อจำกัดบางประการคือ แคดเมียมซัลไฟด์ ($CdSO_4$) ที่ตกตะกอนลงมามีแนวโน้มที่จะอยู่ในรูปของตะกอนที่แขวนลอย ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งเป็นแก๊สที่เกิดขึ้นจากการที่ Sulphide Ion ทำปฏิกิริยากับน้ำ และแก๊สชนิดนี้มีกลิ่นเหม็นและมีความเป็นพิษต่อร่างกาย จะต้องกำจัดซัลไฟด์ส่วนที่เหลืออยู่ออกไปก่อนปล่อยน้ำทิ้ง เช่น โดยการออกซิไดซ์ด้วยเกลือแมงกานีส (Manganese Salts) (กรมควบคุมมลพิษ, 2541, น.63-65)

ยิปซัม (Gypsum)

ยิปซัม (ราชบัณฑิตยสถาน, 2556, น.953) หมายถึง แร่ชนิดหนึ่ง ชื่อไฮเดรเทดแคลเซียมซัลเฟต มีสูตร $CaSO_4.2H_2O$ เมื่อนำไปเผาให้ร้อนถึง 120-130 $^{\circ}$C จะได้ผงสีขาวเรียกว่า ปูนปาสเตอร์, หินเต้าหู้หรือเกลือจืดก็เรียก

ยิปซัม เป็นสายแร่ชนิดหนึ่งที่พบได้ในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ โครงสร้างหลักประกอบด้วยแคลเซียมไอออน (Ca^{2-}) ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) และโมเลกุลของน้ำ (H_2O) มีสูตรทางเคมี คือ $CaSO_4.2H_2O$ จากโครงสร้างดังกล่าวจึงมีการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการเกษตร กล่าวคือ เป็นสารปรับสภาพดินกรดและดินเค็มโดยแคลเซียมไอออนจะเข้าไปอยู่แทนที่อะลูมิเนียมไอออน (Al^{+3}) ในดินกรด และโซเดียมไอออน (Na^{+}) ในดินเค็มได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นการช่วยลดระดับความเป็นกรดและความเค็มในดิน ลดภาวะแน่นทึบของดิน ทำให้ดินมีความร่วนซุย เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ทางการเกษตรมากขึ้น นอกจากนี้ ทั้งแคลเซียมและกำมะถันจากยิปซัมยังเป็นธาตุอาหารเสริมที่สำคัญของพืชอีกด้วย ถ้ามีการนำยิปซัมมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน จะช่วยลดปัญหาความเสื่อมโทรมของดินให้เหมาะสมกับการเพาะปลูก ช่วยเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร และเป็นการอนุรักษ์ดิน สามารถบรรเทาปัญหาพื้นที่ทำกิน อีกทั้งจะทำให้เกิดความยั่งยืนต่อการพัฒนาการเกษตรของประเทศ (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554, น.121-125)

ยิปซัมจำแนกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ ยิปซัมธรรมชาติ (Natural Gypsum) และยิปซัมสังเคราะห์ (Synthetic Gypsum)

ยิปซัมธรรมชาติ (Natural Gypsum)

สมบัติของยิปซัม มีดังนี้ (ปิยะ ดวงพัตรา, 2553, น.88-100)

แร่ยิปซัมเป็นสารประกอบในรูปไดไฮเดรตแคลเซียมซัลเฟตที่มีสูตรทางเคมีว่า $CaSO_4.2H_2O$ และมีแคลเซียมประมาณ 23 % กำมะถัน 18.5 % แต่ในรูปของปุ๋ยหรือสารปรับปรุงดินจะมีแคลเซียม

323307754 2 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

และกำมะถันประมาณ 22 %และ 17 % ตามลำดับ โดยปกติยิปซัมเป็นแร่ที่มีสีขาวเมื่อบริสุทธิ์ แต่อาจไม่มีสีหรือหรือมีสีเทา สีน้ำเงินเทา ชมพู น้ำตาล หรือเหลืองได้ ขึ้นกับสารมลทินต่าง ๆ ที่ทำให้สีของแร่เปลี่ยนแปลงไป ในรูปเม็ดผลึก มีความแข็งต่ำมาก คือมีช่วงความแข็งตามระดับการจำแนกของโมส์ (Mosh Scale) ระหว่าง 1.5-2 เท่านั้น สามารถขีดให้เป็นรอยได้ด้วยเล็บมือ มีความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย 2.23 มีรอยแตกธรรมชาติชัดเจน 1 ทาง และไม่ชัดเจนอีก 1 ทาง ซึ่งจัดได้ว่าเป็นแร่ที่มีน้ำหนักเบา มีระดับ pH เป็นกลาง ละลายน้ำได้ค่อนข้างดี มีรูปร่างที่เกิดแตกต่างกัน แต่ส่วนมากกมีลักษณะเป็นผลึกชัดเจน

การใช้ประโยชน์ในการเกษตร

แร่ยิปซัมสามารนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง โดยทั่วๆ ไปนิยมนำมาทำปูนซีเมนต์ ทำปูนปาสเตอร์สำหรับใช้ในงานต่าง ๆ เช่น แม่พิมพ์ ใช้ในผลิตภัณฑ์ทันตกรรม ทำแผ่นยิปซัม ชอล์ก และอื่น ๆ ในทางเกษตรกรรมยิปซัมสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

1. ใช้เป็นปุ๋ยเพื่อให้ธาตุอาหารพืช ยิปซัมอาจใช้เป็นปุ๋ยเพื่อให้ธาตุแคลเซียมและหรือกำมะถันแก่พืชในกรณีที่ดินขาดธาตุชนิดใดชนิดหนึ่งหรือทั้งสองธาตุ อย่างไรก็ตามการใช้ยิปซัมเป็นปุ๋ยเพื่อให้ธาตุอาหารพืชทั้งสองชนิดยังมีขอบเขตจำกัดมาก เพราะดินโดยทั่ว ๆ ไปมักไม่มีปัญหาการขาดธาตุแคลเซียม ส่วนกำมะถันก็มักเป็นองค์ประกอบอยู่แล้วในปุ๋ยเคมีไม่มากก็น้อย ในรูปปุ๋ยเดี่ยว เช่น ปุ๋ยแอมโนเนียซัลเฟต และปุ๋ยผสมชนิดต่าง ๆ ที่นิยมใช้กันโดยทั่วๆ ไป ในทางปฏิบัติการใช้ยิปซัมเป็นปุ๋ยเคมีที่นิยมกันมากคือ การใช้ยิปซัมกับการปลูกถั่วลิสงโดยวิธีการใส่แบบแต่งข้าง ข้างแถวพืชในระยะก่อนออกดอกเล็กน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งถั่วลิสงที่ปลูกในดินเนื้อหยาบที่มักมีปริมาณแคลเซียมต่ำ ทั้งนี้เพราะพืชชนิดนี้ต้องการแคลเซียมในปริมาณมากเพื่อใช้ในการพัฒนาคุณภาพและความสมบูรณ์ของฝักและเมล็ด ส่วนวิธีการใส่กับพืชอื่น ๆ โดยเฉพาะพืชอายุสั้น นิยมใส่โดยการหว่านลงผิวดิน โดยไม่จำเป็นต้องไถกลบ ถ้าดินมีความชื้นอยู่บ้างแล้ว ส่วนปริมาณการใช้ขึ้นกับผลการวิเคราะห์ว่าดินขาดแคลเซียมหรือกมะถันมากน้อยเพียงใด

2. การใช้เพื่อลดระดับความเค็มของดิน ยิปซัมมีสมบัติช่วยลดความอิ่มตัวของโซเดียมไอออน (Na^+) ในดินเค็ม หรืออีกนัยหนึ่งช่วยลดระดับโซเดียมที่ถ้ามีมากเกินไปจะเกิดผลเสียต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นพิษของโซเดียมที่พืชดูดมากเกินไป และผลของโซเดียมในดินต่อสมบัติทางกายภาพของดิน ที่ทำให้ดินมีลักษณะแน่นทึบ ไถพรวนยาก และเกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหารบางชนิดในดิน เช่นความสมดุลระหว่างเหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) โบรอน (B) ฯลฯ ในเชิงเคมีของดินกลไกของยิปซัมในรูป แอนไฮไดรต์ (Anhydrite หรือ $CaSO_4$) ในการลดปริมาณโซเดียมไอออนในดิน หรือลดระดับความเค็มของดินดังกล่าว อาจเขียมได้เป็นสมการเคมี ดังนี้

$$Na\text{-}Clay + CaSo_4 \longleftrightarrow Ca\text{-}clay + Na_2SO_4$$

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

โดยโซเดียมไอออน (Na^+) ตามสมการเคมีเบื้องต้นหมายถึง โซเดียมที่ถูกยึดอยู่ที่ผิวของสารคอลลอยด์ดินในรูป โซเดียม-เคลย์ (Na-clay) กลไกการใช้ยิปซัมลดความเค็มของดินโดยเฉพาะดินเค็มโซดิก ก็คือการใช้แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่แตกตัวออกจากยิปซัมในรูปแอนไฮไดรด์ (Anhydrite, $CaSO_4$) ไปไล่โซเดียมไอออน โดยการเข้าแทนที่โซเดียมไอออนที่ถูกยึดที่ผิวของสารคอลลอยด์ดินให้กายเป็นแคลเซียมเคลย์ (Ca-clay) แทน แล้วโซเดียมที่ถูกแทนที่ออกมาในรูปของไอออน (Na^+) นั้น ทำปฏิกิริยากับอนุมูลซัลเฟต (SO^-_4) ที่แตกตัวออกมาจากยิปซัมกลายเป็นเกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่ละลายน้ำได้ดีทำให้โซเดียมไอออนที่แตกตัว (ละลาย) ออกมาจากเกลือโซเดียมถูกชะละลาย (Leaching) ออกไปจากดินได้ง่าย โดยฝน ที่ตกลงมาหรือน้ำจืดที่ทดเข้าไปเพื่อล้างเกลือโซเดียมซัลเฟตออกจากพื้นที่ ทำให้ดินเค็มโซดิกมีความเค็มน้อยลง

3. ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน นอกเหนือจากคุณค่าด้านธาตุอาหารและการช่วยลดระดับความรุนแรงของดินเค็มแล้ว แร่ยิปซัมยังมีประโยชน์ต่อการปรับปรุงสมบัติของดินไร่หรือดินในที่ดอนที่มีเนื้อเดียวกัน และดินไร่โดยทั่วๆ ไปที่มีความแน่นทึบสูง ทำให้ดินที่มีสมบัติดังกล่าวที่มีการระบายอากาศและน้ำเลว มีความโปร่งพรุนมากขึ้น และระบายอากาศและน้ำได้ดีขึ้น ทำให้ไม่มีน้ำขังแฉะปนผิวดินที่แน่นทึบ นอกจากนั้นยังช่วยให้ดินไร่กักเก็บน้ำได้ดีขึ้น ทั้งนี้เพราะเมื่อดินที่แน่นทึบโปร่งขึ้น น้ำที่ผิวดินจะสามารถแทรกซึมลงไปเก็บไว้ในดินที่ลึกลงไปได้มากขึ้น ในเชิงเคมีกลไกของแร่ยิปซัมในการแก้ไขดินที่มีโครงสร้างแน่นทึบให้มีความแน่นทึบน้อยลง เพราะอนุภาคเม็ดดินเดี่ยว ๆ เกิดการจับเป็นก้อน (Aggregation) มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การป้องกันการเกิดแผ่นแข็งปิดผิว (Surface Crust) ก็คือการความคุมการฟุ้งกระจายของอนุภาคดินเหนียวในน้ำโดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytes) ในสารละรายรอบเม็ดหรืออนุภาคดินเหนียวให้สูงขึ้นมากพอจนถึงระดับที่จะทำให้อนุภาคจับกลุ่มกันเป็นก้อนในรูปฟล็อก (Floc) อย่างรวดเร็วโดยกระบวนการฟล็อกคูเลชัน (Flocculation) และต่อมาก้อนดินในรูปฟล็อกเกิดการตกตะกอน (Precipitation) ลงสู่ส่วนล่างของหลอดแก้วที่บรรจุสารแขวนลอย หลังจากที่เม็ดดินที่ผิวดินบนโดนเม็ดฝนที่ตกลงมากระแทกแตก และอนุภาคดินส่วนที่เป็นดินเหนียวแขวนลอยปนออกมากับน้ำ ซึ่งในการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว ถ้าไม่มีการใส่ยิปซัม อนุภาคดินเหนียวที่แขวนลอยในน้ำ โดยเฉพาะดินที่มีธาตุโซเดียมสูง จะฟุ้งกระจายในน้ำในรูปสารแขวนลอยและอนุภาคเม็ดดินที่ในสารแขวนลอยที่เกิดขึ้นนี้จะไหลออกไปจากบริเวณเม็ดดินเดิมที่แตกไปอุดรูดิน และจับกันเป็นแผ่นที่ผิวเมื่อดินแห้งตัวลง อย่างไรก็ตามการลดการลดปัญหาความแน่นทึบของดินโดยใช้ยิปซัมนั้น ส่วนใหญ่จะเกิดผลดีเฉพาะในดินบน หรือในส่วนบริเวณผิวหน้าดินที่สารยิปซัมสามารถละลายและแทรกซึมลงไปในดินล่างโดยการนำพาของน้ำเท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งมักจะเกิดผลดีต่อการแก้การเกิดแผ่นแข็งปิดผิว (Surface Crust หรือ Soil Seal) เมื่อดินเปียกและแห้ง มากกว่าการแก้ความแน่นทึบของดินที่ลึกลงไปในดินล่าง ซึ่งผลของการใช้ยิปซัมต่อการลดการเกิดแผ่นแข็งแข็งปิดผิว มีผลทำให้พืชที่ปลูกด้วยเมล็ด เช่น

323307754 2 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ข้าวโพด และฝ้าย มีอัตราการงอกและจำนวนต้นกล้าที่แทงโผล่ผิวดินได้มากกว่าดินที่ไม่ใส่ยิปซัมอย่างเด่นชัด

สรุปได้ว่า ยิปซัมนอกจากจะใช้แก้ไขปัญหาดินเกลือประเภทโซดิกแล้ว ในปัจจุบันยังมีการใช้เพื่อแก่ปัญหาดินแร่ (Mineral Soils) โดยทั่ว ๆ ไปที่มีปัญหาทางกายภาพ เพราะมีโครงสร้างดินไม่เหมาะสมด้วย โดยเฉพาะปัญหาการกร่อนของดิน (Soil Erosion) และการไหลบ่าของน้ำในพื้นที่การเกษตรในที่ดอนที่มีสภาพไม่ราบเรียบ ทั้งนี้เพราะยิปซัมกับดินในพื้นที่ดังกล่าว เกิดผลดีหรือมีกลไกธรรมชาติที่ช่วยลดปัญหาดินกร่อน โดย

1. เพิ่มอัตราการแทรกซึมน้ำ (Water Infiltration Rate) จากผิวดินลงสู่ดินชั้นล่าง ทำให้ดินสามารถกักเก็บน้ำไว้ให้พืชได้มากขึ้น นานขึ้น รวมทั้งธาตุอาหารพืชที่ละลายอยู่ในน้ำ ดังกล่าวด้วย หรืออีกนัยหนึ่งเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำและปุ๋ย (ธาตุอาหาร) ของพืช

2. เพิ่มอัตราการแทรกซึมน้ำตามข้อ 1 ทำให้ลดปัญหาการเกิดการไหลบ่าของน้ำในพื้นที่ที่มีความลาดเท เพราะมีน้ำเหนือผิวเหลืออยู่น้อยลง มีผลทำให้ลดการสูญเสียน้ำที่เกิดจากการไหลบ่าหรือถูกนำพาให้เคลื่อนที่ไปด้วยแรงของน้ำรวมทั้งธาตุอาหารพืชที่ลอยอยู่ในน้ำ เนื้อดิน และอนุภาคอินทรียวัตถุที่ลอยอยู่ในน้ำ

3. ลดปัญหาการเกิดแผ่นแข็งปิดผิว (Surface Crust หรือ Soil Seal) อันเนื่องมาจากการแตกของเม็ดดิน (Soil Aggregate) บริเวณที่มีเสถียรภาพต่ำที่เกิดจากแรงภายนอก โดยเฉพาะแรกตกกระแทกของเม็ดฝน ทำให้เกิดการอุดเคลือบรูดินขนาดใหญ่ และเกิดเป็นแผนแข็งปิดผิวเมื่อดินแห้ง การใช้ยิปซัมจะเกิดกลไกทางธรรมชาติที่ทำให้เม็ดดิน (Soil Aggregate) มีเสถียรภาพสูงขึ้นไม่แตกง่ายอันเนื่องมาจากแรงกระทบเม็ดดินจากภายนอก

ยิปซัมสังเคราะห์ (Synthetic Gypsum)

1. ฟอสโฟยิปซัม (Phosphogypsum) (ปิยะ ดวงพัตรา, 2553, น.101-108)

ฟอสโฟยิปซัมไม่ใช่แร่ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ แต่เป็นผลพลอยได้จากการประกอบอุตสาหกรรม โดยเฉพาะจากการผลิตกรดฟอสฟอริกในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี และโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี หลักการผลิตกรดฟอสฟอริกเป็นแหล่งที่มาของฟอสโฟยิปซัม ได้จากการนำหินฟอสเฟตประเภทฟลูออออพาไทต์ (Fiuorapatite) มาทำปฏิกิริยาทางเคมีกับกรดกำมะถัน โดยกระบวนการเปียก (Wet Process) ดังสมการเคมี

$$Ca_{10}F_2(PO_4)_6 + 10h_2SO_4 + 10nH_2O \longrightarrow 10CaSO_4nH_2O + 6H_3PO_4 + 2HF$$

(โดย n = 0, ½ หรือ 2.0 ขึ้นกับชนิดของยิปซัมที่ต้องการจะให้ตกผลึกในรูปไฮเดรตชนิดใด)

ผลที่ได้ตามสมการเคมีด้านขวาคือส่วนประกอบของกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ในรูปกรดที่ได้จากการผลิตด้วยกระบวนการเปียก (Wet Process Acid) ซึ่งเป็นของเหลวและตะกอนในรูปของแข็งของยิปซัมที่กรองแยกออกมา จากของเหลวในรูปกรด สารยิปซัมที่เป็นผลพลอยได้ในรูปนี้ นอกจาก

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบของจะมีองค์ประกอบในรูปของไฮเดรตเต็ดแคดเซียมซัลเฟตแล้ว ยังมีฟอสฟอรัสจากกรดฟอสฟอริกที่แยกออกไม่หมดและตกค้างปะปนอยู่กับยิปซัมด้วยจึงเรียกผลพลอยได้ของยิปซัมในรูปนี้ว่า ฟอสโฟยิปซัม นอกจากนั้นกรดไฮโดรฟูออริก (HF) ที่เกิดขึ้นบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับธาตุซิลิคอน (Si) ที่ปะปนอยู่ในหินฟอสเฟต ในรูปของสิ่งเจือปน เกิดเป็นสารประกอบซิลิคอนเตะฟลูออไรด์ (SiF_4) และกับสิ่งเจือปนอื่น ๆ ในหินฟอสเฟต (Na K Mg Al ฯลฯ) เกิดเป็นสารประกอบที่สลับซับซ้อนในรูปสารประกอบฟลูออซิลิเกต (Fiuorsilicates) ปะปนมากับยิปซัม ส่วน สารพลอยได้ในรูปซิลิคอนเตะตะคลอไรด์ (SiF_4) และกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ที่เหลือจะระเหิดออกไปจากส่วนผสม

องค์ประกอบและสมบัติทางเคมี

องค์ประกอบโดนทั่วๆไปของสารฟอสโฟยิปซัมที่แห้งจากโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี ประกอบด้วย แอนไฮไดรค์ (Anhydrite) หรือแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ประมาณ 97 % แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) 1 % ฟอสฟอรัสในรูปฟอสฟอรัสเพนตาออกด์ (P_2O_5) 0.6 % ฟลูออออะพาไทต์ (fiuorapatite) ซิลิกา (Si) และสิ่งเจือปนอื่น ๆ เช่น เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) อลูมินัมออกไซด์ (Al_2O_3) ฯลฯ รวมกัน 1.4 % ในกระบวนการผลิตการฟอสฟอริกด้วยกระบวนการเปียก (Wet Process) นั้นจะเกิดผลพลอยได้ในรูปฟอสโฟยิปซัมในรูปแห้งประมาณ 4-5 เมตริกตันต่อปริมาณฟอสเฟตเพนตา-ออกไซด์ (P_2O_5) ในกรดฟอสฟอริกที่ผลิตได้ 1 เมตริกตัน เนื่องจากสารประกอบในรูยิปซัม ($CaSO_4.nH_2O$) ที่เป็นองค์ประกอบหลักในรูปผลพลอยได้แล้ว ฟอสโฟยิปซัมที่ได้จากกระบวนการผลิตกรดฟอสฟอริกยังมีธาตุหรือสารประกอบในรูปต่าง ๆ แตกต่างกันไป ขึ้นกับประเภทของกระบวนการผลิตกรดฟอสฟอริกที่ใช้ ซึ่งโดยทั่วๆไปมี 3 กระบานการ คือ 1. กระบวนการได-ไฮเดรต (Di-Hydrate Process) 2. กระบวนการเฮไม-ไฮเดรต (Hemi-Hydrate Process) 3. กระบวนการเฮไม-ได-ไฮเดรต (Hemi-di-hydrate Process)

เมื่อเปรียบเทียบแร่ยิปซัมที่ขุดจากเหมือง โดยเฉพาะยิปซัมที่มีความบริสุทธิ์สูง ฟอสโฟ-ยิปซัมมีองค์ประกอบหลักในรูปไฮเดรตยิปซัม ($CaSo_4.nH_2O$) มากกว่า 90 % ใกล้เคียงกับแร่ยิปซัมที่ได้จากธรรมชาติ แต่ก็มีองค์ประกอบอื่น ๆที่หลากหลายกว่าทั้งนี้เพราะฟอสโฟยิปซัมมีทั้งฟอสฟอรัส (P) ฟลูออรีน (F) รวมทั้งซิลิกา (SiO_2) และสารประกอบในรูปออกไซด์ของเหล็ก (Fe_2O_3) และอลูมินัม (Al_2O_3) นอกจากนั้นยังมีธาตุอาหารพืชชนิดอื่น ๆ เช่นแมกนีเซียม สังกะสี รวมทั้งสารกัมมันตภาพรังสี เช่น แร่ยูเรเนียม-238 เรเดียม- 226 อยู่ด้วยก็ได้ แต่โดยทั่วไปมักมีสารกัมมันตภาพรังสีอยู่ไม่เกิน 10 Picocurie (pCi) ต่อกรัมซึ่งเป็นระดับค่าวิกฤติที่ถ้ามีมากกว่านี้ ในประเทศอเมริกาจะนำฟอสโฟยิปซัมไปใช้ในการเกษตรไม่ได้ ข้อแตกต่างจากแร่ยิปซัมธรรมชาติคือ ฟอสโฟยิปซัมมีค่าการนำไฟฟ้า (ค่าความเค็ม) ประมาณ 2.0 เดซิซีเม็นต่อเซนติเมตร มีปฏิกิริยาเป็นกรดรุนแรงมาก (pH 2-3) เพราะมีกรดฟอสฟอริกในรูปกรดอิสระปะปนอยู่ด้วย ขณะที่แร่ยิปซัมมีปฏิกิริยาเป็นกลาง (pH 7) ดังนั้นการ

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

พิจารณาใช้แร่ยิปซัมทั้งสองรูป (ยิปซัมในรูปแร่และฟอสโฟยิปซัม) จึงต้องคำนึงถึงสมบัติ pH ของสารทั้งสองชนิดด้วย

การใช้ประโยชน์

ฟอสโฟยิปซัมเป็นผลพลอยได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานผลิตกรดฟอสฟอริก อาจนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทาง คือ

1. นำไปใช้ผลิตปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต โดยการนำไปทำปฏิกิริยากันแก๊สแอมโนเนียและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยวิธีการที่เรียกว่า กระบวนการยิปซัม (Gypsum Process)

2. ใช้ทำซีเมนต์และกรดกำมะถันโดยการเผา (Calcination) กับถ่านโค๊ก (Coke) และแร่ดินเหนียว (Clay Mineral) หรือหินชั้น (หินตะกอนในรูปหิน Shale)

3. ทำปูนปาสเตอร์ อิฐมวลเบา และแผ่นยิปซัมบอร์ดสำหรับเป็นวัสดุก่อสร้าง

4. ใช้ผสมปูนซีเมนต์เพื่อชะลอการแข็งตัวให้ช้าลงตามที่ต้องการ

5. ใช้เป็นสารตัวเติม (Filler) ในการผลิตปุ๋ยเคมีในรูปปุ๋ยผสมหรือใช้เป็นสารเติมแต่ง (Additive) ในปุ๋ยผสมชนิดเม็ดเพื่อช่วยในการทำให้เม็ดปุ๋ยที่ปั้นได้มีความแกร่งมาก (Hardness) ขึ้น

6. ใช้ในการเกษตรเพื่อเป็นปุ๋ยธาตุรอง (ธาตุแคลเซียมและกำมะถัน) และสารปรับปรุงดินในการผลิตพืช โดยเฉพาะดินเค็มและดินที่มีสมบัติทางฟิสิกส์บางประการไม่เหมาะสม

อย่างไรก็ตามในแต่ละปีผลพลอยได้ในรูปฟอสเฟตยิปซัมที่มีประมาณ 150 ล้านตันทั่วโลก ส่วนใหญ่ 60 % ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ใดๆ (กองทิ้งไว้เฉยๆ) ประมาณ 25 % ใช้ถมที่ มีเพียง 15 % เท่านั้นที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การนำไปใช้ประโยชน์ในทางเกษตรกรรมนั้นมีสัดส่วนเพียงประมาณ 7 % ของปริมาณทั้งหมดที่นำมาใช้ประโยชน์ใหม่เท่านั้น

ประโยชน์ต่อการปรับปรุงดินและการปลูกพืช

ในทางการเกษตรที่เกี่ยวกับการปรับปรุงดินและการปลูกพืช ฟอสโฟยิปซัมอาจนำมาใช้ประโยชน์ได้ในหลายๆลักษณะเหมือนกับแร่ยิปซัมดังนี้

1 เพื่อลดปัญหาความเค็มของดิน โดยแคลเซียมในรูปไอออนประจุบวก (Ca^{2+}) ที่เกิดจากการแตกตัวของยิปซัม ($CaSO_4.nH_2O$) ซึ่งมีอยู่ในสารฟอสโฟยิปซัมที่ใส่ลงไปในดินจะเข้าไปแทนที่โซเดียม (Na^+) ที่ดินเค็มดูดยึดไว้ ทำให้สามารถชะล้างโซเดียมออกจากดินได้ง่าย และทำให้ดินมีความเค็มเพราะอิทธิพลของเกลือโซเดียมน้อยลง

2. ใช้เป็นปุ๋ยให้ธาตุแคลเซียมและกำมะถันแก่พืชที่ปลูกในดินที่ขาดธาตุทั้งสองชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินที่ขาดกำมะถัน ตัวอย่างเช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกา การใช้ยิปซัมอัตราประมาณ 200-400 กิโลกรัมต่อไร่ พบว่ามีผลดีกับถั่วลิสงที่มีความต้องการธาตุแคลเซียมและกำมะถันเพื่อไปพัฒนาเมล็ดที่มีคุณภาพสูง และการใช้ฟอสโฟยิปซัมกับไม้ผล เช่น ส้ม ในอัตราประมาณ 400

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

กิโลกรัม/ไร่ พบว่ามีผลดีและยังมีส่วนช่วยลดการเกิดโรครากเน่า และโรคแคงเคอร์ (Cankers) บนลำต้นของสมอีกด้วย (Stanley. D, 1992, p.13)

3. เป็นสารปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน เหมือนกับการใช้ยิปซัม โดยเฉพาะการแก้ไขปัญหาการเกิดแผ่นแข็งปิดผิว (Surface Crust) เมื่อดินเปียกและแห้ง ซึ่งจากการทดลองใช้ยิปซัมเพื่อการอนุรักษ์ดินและน้ำโดยนักวิชาการหลายท่านให้ผลสอดคล้องต้องกันว่า ฟอสโฟยิปซัมช่วยลดการสูญเสียดิน และน้ำอย่างเด่นชัดมาก เช่น จากผลการวิจัยของ Agassi M. (1990, p.162) พบว่าการใช้ฟอสโฟยิปซัมในอัตรา 5 ตันต่อเฮกตาร์ (800 กิโลกรัม/ไร่) ในดินกรูมูโซล (Grumusol Soil) ช่วยลดการสูญเสียน้ำโดยการไหลบ่า (Runoff Water) ประมาณ 25 % และจากผลการทดลองพบว่า ในแปลงที่ปลูกมันฝรั่งแบบยกร่องและให้น้ำทางร่องน้ำ การใช้ฟอสโฟยิปซัมหว่านลงบนดินทรายหลังปลูกในอัตรา 10 ตัน/เฮกตาร์ (1,600 กิโลกรัม/ไร่) มีผลทำให้การไหลบ่าของน้ำลดลง 6 เท่าตัว และการสูญเสียเนื้อดินโดยการกร่อนดิน (Soil Erosion) บนร่องปลูก (Ridge) ลดลง 20 เท่าตัว ซึ่งสรุปได้ว่า การใช้ฟอสโฟยิปซัมมีกลไกเชิงบวกที่ทำให้เกิดการสูญเสียดินและน้ำน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญด้วยเหตุผลสำคัญรวม 3 ประการคือ

3.1 เมื่อใส่ฟอสโฟยิปซัมลงบนผิวดิน ฟอสโฟยิปซัมจะละลายในน้ำฝนที่ตกลงมา น้ำชลประทานหรือน้ำในดิน ถ้าดินมีความชื้นอยู่บ้างแล้วฟอสโฟยิปซัมจะปลดปล่อยอิเล็กโทรไลต์ (electrolytes) หรือแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ออกมา มีผลทำให้น้ำที่ละลายอีเล็กโทรไลต์ซึมลงดินล่างได้ลึกมากขึ้น ทั้งนี้เพราะน้ำที่มีอีเล็กโทรไลต์ละลายอยู่ จะทำให้ผิวดินบนมีความพรุนและยอมให้น้ำแทรกซึมลงไปได้ลึกมากขึ้น

3.2 ฟอสโฟยิปซัมที่หว่านลงไปบนดิน จะทำให้ดินที่มีอยู่เดิมตามธรรมชาติมีเสถียรภาพมากขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งมีความคงทนและไม่แตกยุ่ยง่ายเมื่อโดยเม็ดฝนตกกระแทก ทำให้ปัญหาการเกิดแผ่นแข็งปิดผิว (Surface Crust) เมื่อดินเปียกแล้วแห้งเกิดขึ้นน้อยลง

3.3 ฟอสโฟยิปซัมที่ละลายในน้ำฝนที่ตกลงมากระแทกเม็ดดินเดิมจะแตก จะทำให้อนุภาคของแร่ดินเหนียวที่แขวนลอยอยู่ในน้ำรวมตัวกันเป็นก้อนในรูปฟล็อก (Floc) แล้วตกตะกอนเร็วขึ้นและทำให้มีโอกาสเคลื่อนย้ายหรือไหลไปอุดช่องว่างบนผิวดินได้ช้าลงและน้อยลงด้วยเช่นกัน ทำให้การเกิดแผนแข็งปิดผิว (Surface Crust) เมื่อดินแห้งเกิดได้ไม่เต็มที่ ซึ่งเป็นผลดีต่อการแทรกซึมของน้ำผิวดินลงไปในดินล่าง และลดการไหลบ่าของน้ำและการเกิดการกร่อนดิน (Soil Erosion) ในพื้นที่ดอนที่ไม่ราบเรียบ

ข้อจำกัดในการใช้ฟอสโฟยิปซัม

แม้ว่าฟอสโฟยิปซัมจะเป็นผลผลิตพลอยได้จากอุตสาหกรรมที่ไม่มีราคาหรือราคาถูก และผลการวิจัยเชิงลึก ละเอียดและอย่างกว้างขวางจำนวนมากบ่งชี้ชัดว่าสารชนิดนี้สามารถใช้เพื่อ

323307754 2 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ปรับปรุงสมบัติทางกายภาพบางประการของดินได้ดี และมีผลต่อการลดการสูญเสียของน้ำและดินได้อย่างเด่นชัด แต่ตัวสารฟอสโฟยิปซัมเองก็มีสมบัติที่เป็นจุดอ่อน ข้อเสียหรือข้อควรระวังบางประการคือ

1. ผลพลอยได้ในรูปฟอสโฟยิปซับจากโรงงานผลิตกรดฟอสฟอริกโดยทั่วไป จะมีความชื้นสูงเพราะมีน้ำอิสระ (Free Water) ประมาณ 20 % โดยน้ำหนักหรือมากกว่า ซึ่งไม่เหมาะจะนำไปใช้ในทันทีเนื่องจากตัวสารมีสภาพแฉะและไม่ร่วนไหลดีพอ ดังนั้นก่อนนำไปใช้ประโยชน์จึงจำเป็นจะต้องทำให้เนื้อสารแห้งตัวลงจนถึงระดับความชื้นประมาณ 6 % โดยน้ำหนักเสียก่อน จึงจะมีสภาพร่วนไหลดีพอที่จะใช้ได้สะดวก ซึ่งในทางปฏิบัติก็อาจทำโดยการอบในเตาอบ ซึ่งจะทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเชื้อเพลิง หรืออาจใช้วิธีตากแห้งถ้ามีสภาพอากาศที่เหมาะสม เช่นอากาศนอกฤดูฝนในประเทศแถบร้อน เช่น ในประเทศไทย เป็นต้น ทำให้ไม่ต้องเสียค่าน้ำมันในการอบสารให้แห้งตัวลง

2. จากการทดลองโดยทั่ว ๆ ไป พบว่า ปริมาณการใช้ในการปรับปรุงดิน เพื่ออนุรักษ์ดินและน้ำ จำเป็นต้องใช้ฟอสฟอรัสในปริมาณมากถึงประมาณ 500-1000 Kg/ha ทำให้เป็นภาระในการจัดการและต้องเสียค่าใช้จ่ายต่าง ๆ เกี่ยวกับการใส่สารชนิดนี้ลงในดินมากพอสมควร ได้แก่ ค่าฟอสโฟยิปซัมเอง ค่าขนส่ง ค่าเก็บรักษา และค่าแรงงานในการใส่ ซึ่งการใส่สารชนิดนี้ลงในดินจะเกิดผลคุ้มค่าหรือไม่ก็ขึ้นอยู่กับผลดีที่จะได้รับทั้งทางตรงและทางอ้อม และค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เป็นต้นทุนในการใช้สารชนิดนี้ ซึ่งผลดีโดยตรงก็คือผลต่อการเพิ่มผลผลิตพืช ในฤดูการเพาะปลูกที่มีการใช้และผลโดยอ้อมก็คือผลต่อการอนุรักษ์ดินและน้ำ ที่อาจจะมีผลต่อการควบคุมรักษาระดับผลผลิตของพืชที่อาจจะทำให้ไม่ต่ำไปกว่าเดิมหรือได้รับสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลระยะยาวที่เกษตรกรหรือผู้ใช้ไม่อาจยอมรับได้

3. ฟอสโฟยิปซัมอาจมีกัมมันตภาพรังสีในรูปแร่เรเดียม -226 ผสมปะปนมาด้วยจนถึงระดับที่อาจเกิดอันตรายกับผู้ใช้หรือผู้บริโภค โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามีการฟอสโฟยิปซัมชนิดนี้ไปใช้ในการผลิตพืช โดยมาตรฐานทางด้านความปลอดภัยกับผู้ใช้ ฟอสโฟยิปซัมที่จะใช้ ไม่ควรมีสิ่งเจือปนในรูแร่เรเดียม -226 สูงกว่า 0.01 mg/kg

4. เนื่องจากฟอสโฟยิปซัมเป็นสารเคมีที่มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยธาตุแคลเซียมและกำมะถันเป็นส่วนใหญ่ และยังมีฟอสฟอรัสและแร่ธาตุอื่น ๆ ปะปนมาด้วย การใช้สารชนิดนี้ใส่ลงในดินปริมาณมาก เช่น อัตรา 500-1,000 Kg/ha ทุกปีหรือทุกฤดู อาจมีผลตกค้างในดินทำให้ดินมีสมบัติบางประการไม่เหมาะสม ต่อการปลูกพืชได้ เช่น อาจทำให้ดินมีสมบัติทางเคมีบางประการเปลี่ยนแปลงไปในทางลบ หรืออาจทำให้ดินเนื้อหยาบเกิดการขาดธาตุอาหารประจุบวกบางชนิดได้ เช่น ธาตุโพแทสเซียม แมกนีเซียม ฯลฯ อย่างไรก็ตาม ผลกระทบในทางลบต่อสมบัติดิน หรือสภาพสิ่งแวดล้อมดังกล่าว อันเนื่องมาจากการใช้ฟอสโฟยิปซัมในปริมาณมากอย่างต่อเนื่องก็ยังไม่มีงานวิจัยที่น่าเชื่อถือยืนยันได้ว่าการใช้ในปริมาณมากและอย่างต่อเนื่องเกิดผลเสียจริง เกิดผลเสียอย่างไร และในลักษณะไหนต่อดินและพืชที่ปลูก

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

2. ฟลูออโรยิปซัม (Fluorogypsum)

เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตกรดไฮโดรฟลูออริกหรือกรดกัดแก้ว (HF) จากแร่ฟลูออสปาร์ (Fluotrspar) สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุสร้างถนน

3. ยิปซัมจากกระบวนการกำจัดหรือทำให้กรดซัลฟิวริก

เป็นของเสียที่ใช้แล้วจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อให้เป็นกลางก่นจะนำไปทิ้ง แต่ส่วนมากของเสียจากกระบวนการนี้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เพราะมีปริมาณไม่มากนักและมักมีสิ่งเจือปนสะสมอยู่เป็นจำนวนมากร่วมด้วย (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554, น.120)

4. เอฟจีดียิปซัม (Flue Gas Desulfurization Gypsum; FGD gypsum)

เอฟจีดี ยิปซัมหรือยิปซัมสังเคราะห์ (Synthesis Gypsum) เป็นผลพลอยได้จากระบบดักจับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulfurization Process: FGD) ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินของโรงผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กับน้ำหินปูน ($CaCO_3$ Slurry) ฉีดพ่นเข้าไปในถังทำปฏิกิริยาและออกซิเจน จะเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรท ($CaSO_4.2H_2O$) และมีผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ปนอยู่เล็กน้อย ดังสมการที่ 1-5

ขั้นแรกจะเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนี้

$SO_2(g)+CaCo_3(s) \longrightarrow 1/2H_2O\ CaSO_3.1/2H_2O(s)+CO_2(g)$: pH 7-8

(1)

$CaSO_3.1/2H_2O\ (s) + 2SO_2\ (g) + H_2O \longrightarrow Ca(HSO_3)_2$ (sol.): pH 5

(2)

จากนั้น แคลเซียมไฮโดรเจนซัลไฟต์ ($Ca(HSO_3)_2$) ที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายโดยออกซิเจนในถังปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรท ($CaSO_4.2H_2O$) ดังสมการที่ 3

$Ca(HSO_3)_2$ (sol.) + O_2 + 2 $H_2O \longrightarrow CaSO_4.2H_2O$ (s) + H_2SO_4: pH 5

(3)

และกรดซัลฟูริกที่ได้จะเกิดปฏิกิริยากับหินปูนต่อ ดังสมการที่ 4

$H_2SO_4 + CaCO_3$ (s) + $H_2O \longrightarrow CaSO_4.2H_2O$ (s) + CO_2 (g)

(4)

สมการรวมคือ

$CaCO3\ (s) + SO2\ (g) + ½\ O_2\ (g) + 2H_2O\ (1) \rightarrow CaSO_4.2H_2O(s) + CO_2\ (g)$ (5)

เนื่องจากเอฟจีดียิปซัมที่เกิดจากกระบวนการเคมีเกิดขึ้นเร็วมาก ดังนั้นมีผลทำให้โครงสร้างและสูตรโมเลกุลของยิปซัมที่เกิดขึ้นมีหลายรูปแบบมีรายงานการศึกษาของต่างประเทศพบว่า เอฟจีดียิปซัมมีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่คล้ายกับยิปซัมธรรมชาติ (Natural Gypsum) แต่เอฟจีดี

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ยิปซัมมีรูปร่างของผลึกที่มีการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกับยิปซัมธรรมชาติ จึงมีผลทำให้มีสมบัติ ทั้งทางกายภาพและทางเคมีแตกต่างกัน E. Alvarez-Ayuso (2008, p.549) ได้เสนอว่าเอฟจีดียิปซัมอาจจะนำมาใช้ทดแทนยิปซัมธรรมชาติ ที่มีปริมาณค่อนข้างจำกัด และมีราคาค่อนข้างสูง ซึ่งยิปซัมธรรมชาติไม่เหมาะสมเมื่อใช้ในปริมาณมากในการเกษตรที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ เพื่อใช้เป็นสารปรับปรุงดินและเป็นแหล่งที่ให้สารอาหาร เช่น แคลเซียม (Ca) ซัลเฟอร์ (S) และธาตุอื่น ๆ แก่พืช

ในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา สหพันธรัฐเยอรมัน บราซิล และ แอฟริกาใต้ ได้มีการประยุกต์นาเอาเอฟจีดี ยิปซัม ไปใช้ในการเกษตรในรูปของปุ๋ยผสมโดยใช้ผสมกับแม่ปุ๋ยเพื่อเป็นสารปรับปรุงดิน เป็นแหล่งให้สารอาหารเสริมต่อพืชเพราะเป็นแหล่งสำคัญในการให้แคลเซียม และซัลเฟอร์ ตลอดจนใช้ทดแทนยิปซัมธรรมชาติและปูนไลม์ในการปรับปรุงคุณภาพดิน เอฟจีดี ยิปซัมสามารถแก้ปัญหาความเป็นพิษของอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ในดิน ถ้ามีปริมาณอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) สูง รากพืชจะเจริญเติบโตไม่ดี การใช้เอฟจีดี ยิปซัมทำให้พืชมีระบบรากที่แพร่กระจายในดินมากขึ้น พืชสามารถใช้ธาตุอาหารและน้ำในดินได้มากขึ้น และยิปซัมยังช่วยให้ดินมีโครงสร้างแข็งแรงขึ้น ทำให้เกิดการพังทลายของดินลดลงแต่เนื่องจากถ่านหินที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในแหล่งต่าง ๆ ย่อมมีสภาพแวดล้อมในการเกิดแตกต่างกัน จึงมีการปนเปื้อนของปริมาณธาตุโลหะหนักและปริมาณธาตุอาหารเสริมอยู่ในถ่านหินที่แตกต่างกัน United States Environmental Protection Agency (1993, p.152) ได้ให้คำแนะนำถึงการนำเอฟจีดี ยิปซัมมาประยุกต์ใช้ทางด้านเกษตรกรรม ควรพิจารณาความบริสุทธิ์ของเอฟจีดี ยิปซัมที่นำมาใช้ตลอดจนปริมาณโลหะที่มีปริมาณน้อย (Trace metal) ที่เป็นอันตรายต่อพืชและผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม เช่น คุณภาพน้ำผิวดินและคุณภาพน้ำใต้ดิน (ยุทธ์ดนัย ยอดทองดี, 2555, น.8)

โรงผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน เป็นโรงไฟฟ้าที่มีระบบกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulfurization System) แบบเปียก (Wet Limestone Process) โดยจะใช้หินปูนบดละเอียดเป็นวัตถุดิบเพื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทำให้เกิดผลพลอยได้คือเอฟจีดียิปซัมปริมาณ 26-54 ตัน/ชั่วโมง/เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นปริมาณที่มาก โดยโรงไฟฟ้ามีปริมาณเอฟจีดี ยิปซัมประมาณ 3 ล้านตันต่อปี ต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมากในการขนส่งและต้องใช้พื้นที่จำนวนมากในการเก็บกากเอฟจีดี ยิปซัมดังกล่าว ซึ่งถือว่าเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า (จุฑาภรณ์ ผลิตัน, 2556, น.13)

จากการศึกษาโครงสร้างของเอฟจีดียิปซัมด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X – ray diffraction) พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต และมีซิลิกอนไดออกไซด์ ปะปนอยู่เล็กน้อยองค์ประกอบหลักและองค์ประกอบรองทางเคมีประกอบด้วย แคลเซียมออกไซด์ (CaO) 30.75-31.85 %, ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) 44.35-45.20 %, อลูมีเนียมออกไซด์ (AlO) 0.58-0.61 %, เหล็กออกไซด์ (FeO) 0.19-0.21 %, แมงกานีสออกไซด์ (MnO)

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

0.65-0.70 %, ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (PO_5) 0.08-0.09 %, โซเดียมออกไซด์ (NaO) 0.01-0.02 %, โพแทสเซียมออกไซด์ (KO) 0.01-0.02 %, น้ำผลึก 19.83-20.82 % และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) 0.95-1.12 % ส่วนโลหะหนักพบว่า มีปริมาณปรอท (Hg) น้อยกว่า 0.02 mg/kg, สารหนู (As) 0.17-0.19 mg/kg, ตะกั่ว (Pb) 4.54-6.71 mg/kg, แคดเมียม (Cd) น้อยกว่า 0.02 mg/kg, ทองแดง (Cu) 6.49-6.86 mg/kg, โครเมียม (Cr) 9.54-11.61 mg/kg, นิเกิล (Ni) 1.12-2.31 mg/kgแมงกานีส (Mn) 52.21-74.14 mg/kg และสังกะสี (Zn) 1.82-3.68 mg/kg (ยุทธ์ดนัย ยอดทองดี, 2555, น. 30) นอกจากนี้ Yubo Yan, Xiaoli Dong (2014, p.70) ได้กล่าวถึงองค์ประกอบของเอฟจีดียิปซัมไว้ดังนี้

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเอฟจีดียิปซัม

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละของน้ำหนัก)	ยิปซัม[1]	ยิปซัม[2]	ยิปซัม[3]
CaO	40.1	46.77	37.19
SiO_2	2.12	1.69	1.66
Al_2O_3	1.23	0.63	0.68
Fe_2O_3	0.29	0.67	0.35
MgO	0.18	0.52	0.73
SO_3	55.9	49.54	50.32
K_2O	-	0.05	0.04
Na_2O	-	0.06	-
TiO_2	-	0.03	0.12
MnO_2	-	0.02	-
P_2O_5	-	-	0.07
SrO	-	-	0.04

[1] ที่มา : Yubo, 2014, p.70

[2] ที่มา : Chindaprasirt et al., 2011, p.3199

[3] ที่มา : วราภรณ์ สิทธินาง, 2555, น.9

การใช้ยิปซัมบำบัดโลหะหนักในดิน

นอกจากการประยุกต์ใช้ยิปซัมทางการเกษตร เพื่อแก้ไขปัญหาดินเค็มและปรับปรุงสมบัติดินลดการเกิดเปลือกแข็งปิดผิวดิน (Surface Crust) แล้ว ยังได้มีการประยุกต์ใช้ยิปซัมหรือฟอสโฟ

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ยิปซัมเพื่อการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนสารพิษในสิ่งแวดล้อม เช่น ใช้เพื่อลดการเคลื่อนย้ายและเปลี่ยน แปลงรูปทางเคมีของโลหะหนัก เป็นเทคโนโลยีการบำบัดสิ่งแวดล้อมได้ทางหนึ่ง ตัวอย่างเช่น จากการศึกษาของทัศนางกูล ตุลยากรณ์ (2553, น.68) พบว่า ฟอสโฟยิปซัมสามารถดูดซับโลหะสังกะสี นิเกิล และทองแดงได้ ในขณะที่ยุทธ์ดนัย ยอดทองดี (2555, น.72) ได้ทำการศึกษาการใช้เอฟจีดียิปซัมในการกักเก็บโลหะหนักในพืชที่ปลูกในดินที่ผสม พบว่า ในพืชทดลองมีการดูดโลหะหนักเข้าไปในปริมาณน้อยมาก ซึ่งต้นคะน้ามีการดูดซึมโลหะหนักเข้าไปในปริมาณน้อยมาก ส่วนถั่วเขียวได้ศึกษาในเมล็ดถั่วเขียว พบปริมาณโลหะ ทองแดง และตะกั่ว ถูกเก็บสะสมไว้ในเมล็ดในปริมาณที่ไม่สูงมาก และพบในปริมาณที่ไม่เกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้มีได้ในอาหาร ในขณะที่ตรวจไม่พบแคดเมียม โครเมียม นิเกิล สารหนู และปรอท ในพืชทั้งสองชนิด

ยาสูบ

ยาสูบนับเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยมากพืชหนึ่ง ซึ่งสามารถสร้างอาชีพและรายได้จำนวนมากให้กับชาวไร่ยาสูบและผู้ที่เกี่ยวข้องในประเทศปีละหลายล้านบาท ผลผลิตยาสูบในประเทศเดิมเป็นการผลิตเพื่อใช้ภายในประเทศสำหรับผลิตบุหรี่ แต่ในระยะเวลา 30 ปีที่ผ่านมาการผลิตและการค้ายาสูบได้ขยายตัวมากขึ้น จนกระทั่งผลผลิตใบยาสูบภายในประเทศประมาณ 50 % และที่เหลือ 50 % จะส่งออกไปจำหน่ายต่างประเทศ ใบยาสูบเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญมาก รายงานของกรมสรรพสามิต ปี 2546/47 รายงานว่ายาสูบทำรายได้ให้แก่ประเทศปีละ 2,500-3,000 ล้านบาท ภายในประเทศผลิตบุหรี่จำหน่ายโดยโรงงานยาสูบ ส่งรายได้ให้แก่รัฐปีละ 28,000-30,000 ล้านบาท ในภาคเกษตรกรรมมูลค่าของใบยาสูบที่เป็นรายได้ของเกษตรกรปีละประมาณ 4,000-5,000 ล้านบาท คิดเป็นมูลค่าทั้งสิ้น 30,000-31,000 บาท นับเป็นมูลค่าสูงมากเมื่อเทียบกับมูลค่าผลิตผลอื่น ๆ ที่ส่งออกเป็นอันดับ 1 ของโลก เช่น มันสำปะหลัง ข้าว ยางพารา อย่างไรก็ตามประเทศไทยยังต้องนำเข้ายาสูบตัวรสนำ (Flavour) เพื่อใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตบุหรี่ ซึ่งทำให้ไทยเสียบเปรียบด้านดุลการค้าให้กับต่างประเทศจำนวนมาก (วิภาวรรณ กิติวัชระเจริญ, ม.ป.ป. น.1)

ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับยาสูบ

ยาสูบ (Tobacco) ชื่อวิทยาศาสตร์ *Nicotiana tabacum Linn*. วงศ์ *Solanaceae* เป็นไม้ล้มลุก สูงประมาณ 1 - 1.5 เมตร ลำต้นตรงมีขนอ่อนนุ่มปกคลุม ไม่แตกกิ่งก้าน ใบเดี่ยวเรียงตัวสลับเวียนรอบลาต้น รูปวงรี หรือรูปใบหอก ขอบใบเรียบ เนื้อบางนุ่ม ผิวมีขน ดอกช่อแบบ Panicle กลีบเกลี้ยงสีขาวเป็นซี่แหลม กลีบดอกสีชมพูอ่อนติดกัน เป็นรูปกรวยแยกเป็น 5 แฉก ออกผลลักษณะเป็นแคปซูล ขยายพันธุ์โดยใช้เมล็ด ดินที่เหมาะสมกับการเพาะปลูกยาสูบต้องเป็นดินร่วน

323307754 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ปนทราย ดินร่วน และดินร่วนปนดินเหนียว ควรเลือก ที่สูง มีการระบายน้ำดี ค่า pH ของดินอยู่ระหว่าง 5.6-6.5 การเตรียมดินควรไถให้ลึกอย่างน้อย 6-8 นิ้ว เพื่อให้รากหยั่งลึกไปในดินและเจริญเติบโตได้ดี ควรปลูกเป็นแถวเดี่ยวแบบยกร่อง ความต้องการน้ำของต้นยาสูบในระยะเดือนแรกมีน้อยมาก แต่หลังจากปลูกแล้ว 30-40 วัน ต้องการความชุ่มชื้นสูงเพื่อการเจริญเติบโต มีสรรพคุณ คือ ใบที่แก่มีลักษณะเป็นสีเหลืองใช้เป็นยา มีสรรพคุณในการฆ่าพวกแมลง เหา และเพลี้ย ทางการแพทย์ไม่มีการใช้ประโยชน์ในรูปยาแต่ทางการเกษตรมีการนามาใช้ในการฆ่าแมลง ยาสูบเป็นพืชควบคุมภายใต้พระราชบัญญัติยาสูบ ควบคุมดูแล โดยกรมสรรพสามิต ใช้ใบเป็นผลผลิตในอุตสาหกรรมบุหรี่ แบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ตามการบ่มได้ 3 ประเภท

1. ยาสูบ ประเภทบ่มไอร้อน (Flue-Cured Tobacco) ได้แก่ ยาสูบเวอร์จิเนีย
2. ยาสูบประเภทบ่มอากาศ (Air-Cured Tobacco) ได้แก่ ยาสูบเบอร์เลย์
3. ยาสูบประเภทบ่มแดด (Sun-Cued Tobacco) ได้แก่ ยาสูบเตอร์กิช

การเพาะปลูกยาสูบ

การเพาะกล้า

งานอันดับแรกของการทำไร่ยาสูบ คือ การเพาะกล้ายาสูบ ต้นยาสูบในไร่จะเจริญเติบโตดีต้องมาจากต้นกล้าที่สมบูรณ์ แข็งแรง เมื่อนำไปปลูกแล้ว ต้นกล้าตายน้อยที่สุด หรือไม่ตายเลย ถ้าต้นกล้าตายหลังจากปลูก 7-10 วัน ควรจะมีการปลูกซ่อมกล้า และไม่ควรจะปลูกซ่อมบ่อย ๆ เพราะการซ่อมกล้าเพียง 10 % จะทำให้คุณภาพลดลงได้ถึง 5 % ทั้งนี้เนื่องจากการเก็บใบยาสูบไปบ่มผู้เก็บมักจะเก็บทุกต้นเหมือนกันหมด ทำให้มีใบยาที่ไม่สุกติดเข้าไปบ่มด้วย ทำให้คุณภาพใบยาลดลง

การที่จะผลิตต้นกล้าให้มีความสมบูรณ์ และแข็งแรง จะต้องมีการเตรียมและทำแปลงเพาะกล้าที่ดีมาก่อน นับตั้งแต่การเลือกที่ดิน ควรเป็นดินที่อุดมสมบูรณ์ มีการระบายน้ำดี ถ้าเป็นดินบุกเบิกใหม่ยิ่งดี หลังจากเตรียมดินยกเป็นแปลง (กว้าง 1 เมตร ยาว 11 เมตร) แล้วคลุมด้วยผ้าพลาสติกและรมด้วยแก๊สเมทิลโบรไมด์ นานประมาณ 24-48 ชั่วโมง เพื่อกำจัดโรคแมลง และวัชพืชในดิน เมื่อเปิดผ้าพลาสติกออกแล้ว ผึ่งดินทิ้งไว้ 12-24 ชั่วโมง ใส่ปุ๋ยรองพื้นสูตร 4-16-25 ในอัตรา 2-4 กิโลกรัมต่อแปลง และใส่ยาฟูราดาน 3 จี เพื่อป้องกันโรคใบหดในอัตรา 250-300 กรัมต่อแปลง แล้วกลับปุ๋ยและยาให้อยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 1-2 นิ้ว เพื่อป้องกันไม่ให้เมล็ดยาสูบที่หว่าน ได้รับอันตรายจากปุ๋ยและยา

การหว่านเมล็ด

เนื่องจากเป็นเมล็ดที่มีขนาดเล็กมาก (เมล็ดยาสูบ 1 กรัม มีจำนวนประมาณ 10,000-12,000 เมล็ด) จึงควรนำเมล็ดผสมขี้เถ้าในการหว่าน เพื่อให้กระจายทั่วแปลง หรือใส่เมล็ดลงใน

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

บัวรดน้ำ คนเมล็ดให้กระจายเข้ากับน้ำจนทั่ว แล้วรดให้ทั่วแปลง โดยใช้เมล็ดแปลงละ 1.0-1.5 กรัม รดน้ำให้ชุ่ม แล้วคลุมแปลงเพาะด้วยผ้าดิบ เพื่อป้องกันแสงแดดในเวลากลางวัน และลดแรงกระแทกของน้ำฝน ในฤดูฝน ถ้าเป็นฤดูแล้งอาจใช้แกลบคลุมได้

การรดน้ำ

รดน้ำวันละ 4 ครั้ง จนกว่าเมล็ดจะงอก จึงค่อย ๆ ลดลงเหลือวันละ 2-3 ครั้ง การพ่นสารเคมีป้องกันโรคและแมลง จะต้องทำทุกสัปดาห์ หลังจากเมล็ดงอกแล้ว โรคที่สำคัญในแปลงเพาะได้แก่ โรคโคนเน่า และโรคแอนแทรกโนส สำหรับแมลงได้แก่ หนอน และแมลงหวี่ขาว เมื่อกล้ายาสูบมีอายุ 35-45 วัน จึงถอนย้ายไปปลูกในไร่

การทำไร่ยาสูบ

ยาสูบเป็นพืชที่ต้องการน้ำฝน และความชุ่มชื้นในอากาศ ดังนั้น การปลูกยาในช่วงกลางถึงปลายฤดูฝน จึงจะได้ใบยาที่มีคุณภาพดี เป็นที่ต้องการของตลาด ทั้งในประเทศ และต่างประเทศ สมัยก่อนชาวไร่จะปลูกยาสูบในนาหลังจากเก็บเกี่ยวข้าวแล้ว ซึ่งเป็นช่วงฤดู แล้ง ทำให้ใบยาแห้งที่ได้ขาดคุณภาพที่ดี ปัจจุบันชาวไร่เลื่อนเวลาเพาะปลูกให้เร็วขึ้น แต่ปัญหาที่ตามมาคือ โรคและแมลงมีมากตามขึ้นมาด้วย ดังนั้น การป้องกัน และกำจัดแมลง จึงมีความสำคัญต้องดูแลอย่างสม่ำเสมอ ดินที่เหมาะสมกับการเพาะปลูกยาสูบต้องเป็นดินร่วนปนทราย ดินร่วน และดินร่วนปนดินเหนียว ควรเลือกที่สูง มีการระบายน้ำดี ค่าpHของดินอยู่ระหว่าง 5.6-6.5 การเตรียมดินควรไถให้ลึกอย่างน้อย 6-8 นิ้ว เพื่อให้รากหยั่งลึกไปในดิน และเจริญเติบโตได้ดี ควรปลูกเป็นแถวเดี่ยวแบบยกร่อง ความต้องการน้ำของต้นยาสูบในระยะเดือนแรกมีน้อยมาก แต่หลังจากปลูกแล้ว 30-40 วัน ต้องการความชุ่มชื้นสูง เพื่อการเจริญเติบโต การเลือกใช้ปุ๋ยเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะอาหารธาตุไนโตรเจนต้องไม่สูงเกินไป มิฉะนั้นจะทำให้คุณภาพใบยาแห้งลดลง การเก็บใบยาสดแต่ละครั้ง จะต้องรอให้ใบยาสุกจริง ๆ เพื่อให้ได้ใบยาแห้งที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ

ยาสูบพื้นเมือง

ยาพื้นเมืองที่โรงงานยาสูบนำมาใช้ในกิจการ ได้มาจากจังหวัดกาญจนบุรี และสุพรรณบุรี ปัจจุบันนำมาใช้ในลักษณะของยาเส้น

การเพาะกล้า

วิธีการปฏิบัติคล้าย ๆ กับการเพาะกล้ายาสูบประเภทอื่น ๆ โดยเริ่มหว่านเมล็ดประมาณเดือนกรกฎาคม - สิงหาคม เมื่อกล้ามีอายุประมาณ 1 เดือน ถอนย้ายกล้าไปชำในแปลงใหม่อีกประมาณ 1 เดือน ก่อนนำไปปลูกในไร่

ไร่ปลูก

ส่วนมากปลูกในที่ดินบุกเบิกใหม่ หรือที่ดินริมน้ำ ไม่นิยมใส่ปุ๋ย ไม่ใช้สารป้องกัน หรือกำจัดโรคและแมลง พอดินจืด ก็ย้ายหาที่ปลูกใหม่ การปลูกยาสูบพื้นเมืองอาศัยธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ไม่ต้องให้น้ำมาก นอกจากในระยะแรก ๆ ที่ย้ายกล้าปลูกเท่านั้น การปลูกจะเริ่มกันในเดือนตุลาคม - พฤศจิกายน และเก็บใบยาสด เมื่อต้นยาสูบอายุประมาณ 100 - 120 วัน เสร็จสิ้นการเก็บใบยาประมาณเดือนมกราคม หรือประมาณ 2 เดือน หลังจากเริ่มเก็บใบยาสดครั้งแรก

การเก็บใบยาสดและการบ่ม

การเก็บใบยาสดในประเทศไทยยังใช้วิธีเก็บด้วยมือ โดยเก็บจากใบยาล่างขึ้นไปหายอด และควรจะเก็บในเวลาเช้า การเก็บให้เลือกเฉพาะใบยาที่เริ่มแก่หรือสุกเท่านั้น เพราะมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับคุณภาพใบยาแห้ง การเก็บครั้งหนึ่ง ๆ ประมาณ 3-5 ใบต่อต้น แต่ละครั้งห่างกัน 5-10 วัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของใบยา และตำแหน่งของใบบนลำต้น เช่น ใบยาชั้นล่างจะแก่หรือสุกเร็วกว่าใบยายอด เป็นต้น

โรคของยาสูบ

สาเหตุที่ทำให้ยาสูบเกิดโรคมีอยู่หลายประการ ทั้งที่เกิดจากเชื้อโรคที่มีชีวิต เช่น รา แบคทีเรีย ไวรัส และไส้เดือนฝอย หรืออาจเกิดจากสิ่งที่ไม่มีชีวิต เช่น สภาพแวดล้อมที่ผิดปกติ และการขาดธาตุอาหารต่าง ๆ โรคที่สำคัญ และพบเห็นเป็นประจำ ได้แก่

โรคในแปลงเพาะกล้า

1. โรคโคนเน่า (Damping-off)

เกิดจากเชื้อราพิเทียม หรือไรซอกโทเนีย (Pythium spp. หรือ Rhizoctonia spp.) ที่อาศัยอยู่ในดิน ทำให้ต้นกล้าเน่าล้มลงกับพื้นดิน

2. โรคแอนแทรกโนส (Anthracnose)

เกิดจากเชื้อรา คอลลีโทตริกุม หรือกลีโอสปอเรียม (Colletotrichum sp. or Gloeosporium sp.) เชื้อโรคเหล่านี้อาศัยอยู่ในดิน หรืออาจปลิวมาตามลม หรือติดมากับเมล็ดได้ อาการเริ่มแรกคือ ใบเป็นจุดช้ำ แล้วต้นกล้าจะยุบตัวลงคล้ายกับโรคโคนเน่า การป้องกัน และกำจัด นอกจากใช้ยาเคมีแล้ว ควรเปิดผ้าคลุมแปลงเพาะให้ต้นกล้าได้รับแสงแดดอยู่เสมอ ในเวลาเช้าและเย็น เพื่อลดความชื้นในดิน ถ้าต้นกล้าขึ้นแน่นเกินไป ควรถอนทิ้งบ้าง

โรคในไร่ปลูก

1. โรคตากบ (Frogeye)

เกิดที่ใบ เป็นแผลแห้งกลม ๆ ทั่วไป เนื่องจากเชื้อราเซอร์โคสปอเรียม (Cercosporium Nicotianae Ell. & Ev.) พบมาก เมื่ออากาศร้อน และความชื้นสูง เช่น ฤดูฝน

2. โรคใบจุดสีน้ำตาล (Brown Spot)

เกิดจากเชื้อราแอลเทอร์นาเรีย (Alternaria Alternata Fries.) พบในช่วงที่อากาศอบอุ่นและความชื้นปานกลาง ใบจะเป็นจุดสีน้ำตาลเป็นวงซ้อน ๆ กัน

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

3. โรคราแป้ง (Powdery Mildew)

เกิดบนใบ เป็นกลุ่มผงสีขาวคล้ายโรยด้วยแป้ง เนื่องจากเชื้อราอีริซิฟี (Erysiphe Chichoracearum DC.) ระบาดเมื่ออากาศเย็น ความชื้นปานกลาง ได้รับแสงแดดน้อย เช่น ไร่ยาสูบที่อยู่ตามเชิงเขา

4. โรคไฟลามทุ่งและใบจุดเหลี่ยม (Wildfire and Angular Leaf Spot)

เกิดจากเชื้อบัคเตรีซูโดโมนัส (Pseudomonas Tabaci (Wolf & Foster) Steven) อาศัยอยู่ในดิน จะระบาด เมื่อมีความชื้นสูง เริ่มแรกใบยาสูบจะเป็นรอยช้ำ และเป็นแผลกลม ๆ หรือรูปเหลี่ยม อาการนี้มักจะเกิดปนกัน

5. โรคใบหด (Leaf Curl)

เกิดจากเชื้อไวรัส โดยมีแมลงหวี่ขาว (White fly-Bemisia Tabaci Genn.) เป็นพาหะนำโรค ระบาดมากในช่วงฤดูฝน ถึงปลายฤดูฝน ถือได้ว่า เป็นโรคที่มีความสำคัญมากที่สุด ของการเพาะปลูกยาสูบในประเทศไทย ใบยาสูบจะม้วนลง หรือเป็นคลื่น แล้วแต่ความรุนแรงของโรค การป้องกันและกำจัด ควรใช้ยาประเภทดูดซึมจะได้ผลดีที่สุด เช่น ฟูราดาน 3 จี หรือคูราแทร์ ใส่รองก้นหลุมก่อนปลูกยาสูบต้นละ 2 กรัม และควรพ่นสารเคมีฆ่าแมลงประเภทดูดซึมชนิดอื่นอีกทุกสัปดาห์

6. โรคใบด่าง (Mosaic)

เกิดจากเชื้อไวรัสติดต่อได้ง่ายโดยการสัมผัส สีของใบไม่สม่ำเสมอ บางครั้งใบเสียรูปทรง

7. โรคแผลละเอียด (Streak)

เกิดจากเชื้อไวรัส ระบาดได้โดยการสัมผัส และแมลงพวกตั๊กแตนที่กัดกินใบ จะเห็นแผลสีน้ำตาลเล็ก ๆ เกิดขึ้นระหว่างเส้นใบ การป้องกันและกำจัด ควรพ่นสารเคมีฆ่าแมลงเป็นประจำ และล้างมือให้สะอาดอยู่เสมอระหว่างปฏิบัติงานในไร่ด้วยน้ำกับสบู่ หรือน้ำยาไตรโซเดียมฟอสเฟต 3 เปอร์เซ็นต์

8. โรคเหี่ยวด้านเดียว (Fusarium Wilt)

เกิดจากเชื้อราฟิวซาเรียมที่อาศัยอยู่ในดิน (Fusarium Oxysporum Schlecht) เชื้อโรคเข้าทำอันตรายทางราก ทำให้ใบเหี่ยวเพียงด้านเดียวของลำต้น แต่ในระยะสุดท้ายจะเหี่ยวทั้งต้น

9. โรคแข้งดำ (Black Shank)

เกิดจากเชื้อราไฟทอฟโทรา (Phytopthora Parasitica Var. Nicotiana (Breda De Haan) Tucker) เป็นเชื้อโรคที่อาศัยอยู่ในดินได้เป็นเวลานาน เข้าทำลายทางราก ทำให้ใบและลำต้นเหี่ยวตาย

10. โรคเหี่ยวเฉา (Bacterial Wilt)

เกิดจากเชื้อบัคเตรีซูโดโมนัสที่อาศัยอยู่ในดิน (Pseudomonas Solanacearum Smith) เข้าทำอันตรายทางราก ทำให้ใบและลำต้นเน่าและเหี่ยวในที่สุด การป้องกันและกำจัด ควรปลูกพืช

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ชนิดอื่นหมุนเวียนสลับกับการปลูกยาสูบ และควรปลูกยาสูบพันธุ์ที่มีความต้านทานต่อโรคโดยเฉพาะ เช่น พันธุ์โคเกอร์ 48 และสเปจต์จี 28 (Speight G-28) ซึ่งมีความต้านทานต่อเชื้อโรคที่อยู่ในดินทั้งสามชนิดข้างต้น หรือ พันธุ์โคเกอร์ 319 ซึ่งมีความต้านทานต่อโรคเหี่ยวด้านเดียว พันธุ์เค (K-399) มีความต้านทานต่อโรคแข้งดำ และพันธุ์โคเกอร์ 347 มีความต้านทานต่อโรคเหี่ยวเฉาโดยเฉพาะ เป็นต้น แต่ทั้งนี้ในบริเวณนั้นจะต้องปราศจากไส้เดือนฝอยรากปม เนื่องจากจะเข้าทำอันตรายระบบราก ทำให้พืชลดความต้านทานลง หรือหมดความต้านทานเลย

11. โรคไส้เดือนฝอยรากปม (Root-Knot Nematode)

เกิดจากพยาธิตัวกลมเมลอยโดกาย (Meloidogyne spp.) อาศัยอยู่ในดิน มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ทำให้รากบวมโตผิดปกติ ต้นพืชจะดูดน้ำและอาหารได้ยาก ทำให้ผลิตผลลดลง และพืชลดความต้านทานโรคลงด้วย

การป้องกันและกำจัด มีวิธีปฏิบัติอยู่ 2 วิธี คือ การใช้ยาฉีดลงไปในดิน (Fumigation) และปลูกพืชชนิดอื่นหมุนเวียนสลับกับยาสูบ เช่น ข้าว ข้าวโพด และงา เป็นต้น เพื่อลดปริมาณไส้เดือนฝอยลง สำหรับวิธีแรกนั้นได้ผลดี แต่เสียค่าใช้จ่ายสูง

นอกจากนี้อาการขาดธาตุอาหารต่าง ๆ เช่น ไนโตรเจน โพแทสเซียม แมกนีเซียม โบรอน และแคลเซียม ซึ่งพบเห็นเป็นประจำ รวมทั้งสภาพแวดล้อมที่ผิดปกติต่าง ๆ เช่น ความหนาวเย็น อากาศเป็นพิษ และการใช้สารเคมีไม่ถูกวิธี ก็ ถือว่าเป็นอาการของโรคยาสูบเช่นเดียวกัน ซึ่งเราสามารถป้องกัน และแก้ไขได้

แมลงศัตรูพืช

แมลงที่มีความสำคัญ และเป็นอุปสรรคกับการเพาะปลูกยาสูบในประเทศไทยแบ่งออกเป็น 2 จำพวกใหญ่ ๆ คือ

1. แมลงจำพวกปากดูด

1.1 แมลงหวี่ขาว (White Fly)

เป็นแมลงที่ทำให้เกิดปัญหามากที่สุด ในการเพาะปลูกยาสูบในประเทศไทย คือ เป็นพาหะนำเชื้อโรคไวรัสมาสู่ต้นยาสูบ ทำให้เกิดโรคใบหด

1.2 เพลี้ยอ่อนยาสูบ (Green Peach Aphid : Myzus Persicae Sulzer)

เกาะดูดน้ำเลี้ยงบนใบ และขับถ่ายมูลซึ่งเป็นอาหารอย่างดีของราดำ ทำให้ใบยาขาดคุณภาพ การป้องกันและกำจัด ปฏิบัติเช่นเดียวกับการป้องกัน และกำจัดโรคใบหด

2. แมลงจำพวกปากกัด

2.1 หนอนคืบกินกล้า (Cabbage Looper : Trichoplusia sp.)

2.2 หนอนกระทู้กินยอด (Tobacco Budworm : Helicoverpa Armigera Hubner)

323307754 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

2.3 หนอนกระทู้กินใบ (Tobacco Leaf Eating Caterpillar : Spodoptera Litteralis Fabricius)

การป้องกัน และกำจัด ถ้าใช้ยาฟูราดาน 3 จี หรือคูราแทร์ รองก้นหลุมก่อนปลูกยาสูบ จะป้องกันหนอนกระทู้ได้ 30-40 วัน แล้วจึงพ่นด้วยยาเมโทมิล (แลเนตและนูดริน) หรือออร์ทีนทุก ๆ 7 วัน

นอกจากนี้ยังมีแมลงอื่น ๆ อีกหลายชนิดแต่การระบาดไม่ค่อยรุนแรงนัก เช่น หนอนเจาะลำต้นยาสูบ (Tobacco Stem Borer) ตั๊กแตนหนวดสั้น (Short Horned Grasshopper) ตั๊กแตนหนวดยาว (Long Horned Grasshopper) หนอนกระทู้กัดต้นยาสูบ (Tobacco Cutworm) จิ้งหรีดโป่ง (Field Cricket) แมลงกระชอน (Mole Cricket) และด้วงขาวกินรากยาสูบ (White Grub)

แมลงที่ทำความเสียหายกับใบยาแห้งมี 2 ชนิด คือ มอดยาสูบ (Cigarette Beetle) และ ชีปะขาวยาสูบ (Tobacco Moth) การป้องกัน และกำจัด ใช้การรมด้วยแก๊ส และรักษาความสะอาดภายใน และภายนอกโรงเรือน ที่เก็บใบยา จะได้ผลดีที่สุด

การจัดชั้นใบยา

ใบยาที่บ่มเสร็จเรียบร้อยแล้ว (เวอร์ยิเนีย และเบอร์เลย์) จะต้องนำมาคัดเป็นใบ ๆ เพื่อกำหนดชั้นมาตรฐานให้ถูกต้อง สำหรับการซื้อขาย แล้วรวมมัดใบยาชั้นเดียวกันเข้าด้วยกันเป็นกำ ๆ และมัดหัวกำ ด้วยใบยาอีกทีหนึ่ง นำใบยาชั้นเดียวกันมาอัดรวมเป็นห่อ โดยใช้เครื่องอัดใบยา ซึ่งทำขึ้นโดยเฉพาะ ใบยาแต่ละห่อหนักประมาณ 60-70 กิโลกรัม แล้วห่อหุ้มด้วยกระสอบป่าน สำหรับใบยาเตอร์กิช ได้คัดและแยกใบยาเป็นพวก ๆ ตามขนาดและคุณภาพ ตั้งแต่หลังจากเก็บใบยาสดแล้ว และนำมาร้อยด้วยเชือกแยกเป็นพวก ๆ หลังจากนั้นจึงนำใบยาที่แห้งและกองหมักได้ที่แล้ว มาอัดเป็นห่อ ๆ ได้เลย ห่อหนึ่ง ๆ หนักประมาณ 15-20 กิโลกรัม

ใบยาเวอร์ยิเนีย

การจัดชั้นใบยาได้อาศัยหลักมาตรฐานการจัดชั้นใบยาเวอร์ยิเนียอเมริกัน ซึ่งประกอบด้วย หมู่ คุณภาพ และสี ดังนี้

หมู่ การจัดใบยาสูบให้อยู่ในหมู่ใดนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะบางประการ ที่มีส่วนสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับตำแหน่งของใบบนลำต้น

คุณภาพ การจัดใบยาสูบให้อยู่ในระดับคุณภาพใดนั้น ขึ้นอยู่กับระดับสูงต่ำขององค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ขนาดของใบยากว้างยาว ตำหนิ และส่วนเสีย เป็นต้น

สี สีเป็นองค์ประกอบที่จะระบุคุณค่าของใบยา ใบยาแต่ละสีจะมีกลิ่นและรสแตกต่าง

ใบยาเบอร์เลย์

การจัดชั้นใบยาได้อาศัยหลักมาตรฐานการจัดชั้นใบยาเบอร์เลย์อเมริกาเช่นเดียวกัน ซึ่งประกอบด้วย หมู่ คุณภาพและสี

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ใบยาเตอร์กิช

การจัดชั้นใบยาได้อาศัยหลักแนวทางเดียวกับการจัดชั้นใบยาเวอร์ยิเนีย และเบอร์เลย์ของไทย แต่ใช้เพียงอักษร 1 ตัว และตัวเลข 1 ตัว โดยที่ตำแหน่งของใบบนลำต้น เป็นตัวกำหนดขนาดของใบยาไปด้วย เช่น ใบยายอด จะมีขนาดของใบกว้างเกิน 7 เซนติเมตร และยาวเกิน 11 เซนติเมตรไม่ได้ ใบยาล่างจะมีขนาดของใบกว้างเกิน 13 เซนติเมตร และยาวเกิน 17 เซนติเมตรไม่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากคุณภาพของใบยาเตอร์กิช จะดีที่สุดจากใบยายอดลงมาถึงใบยาล่าง ตามลำดับ ใบยาขนาดเล็กคือ ใบยายอด จะมีคุณภาพดีกว่าใบยาขนาดใหญ่คือ ใบยาล่าง

ยาพื้นเมือง

การจัดชั้นคุณภาพยาเส้นพื้นเมือง ยังไม่มีการกำหนดหลักเกณฑ์ที่แน่นอน อาจจะเป็นเพราะยังมีปริมาณการผลิตที่ไม่มากพอ (ในปีหนึ่ง ๆ ยาเส้นพื้นเมืองที่ผลิตในจังหวัดกาญจนบุรี และสุพรรณบุรี มีประมาณหนึ่งล้านกิโลกรัม) หรือยังไม่มีหน่วยงานใดที่ส่งเสริมการเพาะปลูก และรับผิดชอบโดยตรง การซื้อขายยาเส้นพื้นเมืองจึงเป็นการตกลง ตามความพอใจระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย ซึ่งผู้ซื้อ จะมีความชำนาญในการดูคุณภาพยาเส้นพอสมควร ขณะนี้ยาเส้นคุณภาพอย่างดี ราคากิโลกรัม ละ 90-120 บาท (อุทิศ เกตุทัต, 2535, น.59-81)

การปลูกยาสูบพื้นที่จังหวัดสุโขทัย

พันธุ์ที่ปลูก พันธุ์ TN90 เป็นประเภทบ่มอากาศ เรียกว่า ยาสูบเบอร์เลย์ ใบยามีคุณสมบัติพิเศษกว่าประเภทอื่น คือ มีโครงสร้างโปร่ง ดูดซับน้ำหอม น้ำปรุง ได้ดี มีสมบัติในการเผาไหม้ดี ในการผลิตบุหรี่ รสอเมริกันโดยทั่วไปใช้ใบยาเบอร์เลย์ 14-45% ใบยาแห้งมีสีเนื้อ หรือน้ำตาลอ่อนจนถึงน้ำตาลแก่ ปริมาณนิโคตินสูง (2.5-4.0%) ปริมาณน้ำตาลน้อยมาก (0-4%) มีน้ำหนักเบา คุณภาพในการบรรจุมวนดี เป็นใบยาที่มีคุณภาพดี มีกลิ่นหอมคล้ายโกโก้

พื้นที่ปลูก

ประมาณ 32,000 – 40,000 ไร่ อ.ศรีสำโรง, อ.เมือง, อ.สวรรคโลก และในฤดูกาลผลิต 2558/2559 มีพื้นที่ปลูกใหม่ทั้งหมด 14,558 ไร่ (สำนักงานเกษตรจังหวัดสุโขทัย, 2558, น.11)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จันทร์เพ็ญ ชุมแสง (2552, น.79-80) ได้วิจัยผลกระทบทางนิเวศพิษวิทยาของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินบางชนิดของประเทศไทยต่อสิ่งมีชีวิตในดิน ในประเด็นการปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม รูปทางเคมีและการแพร่กระจายของแคดเมียมในความเข้มข้นต่าง ๆ ในดินบางชนิดของประเทศไทย โดยทดลอง รูปทางเคมีและการแพร่กระจายของแคดเมียมในดินบางชนิด โดยวางแผนการทดลองแบบ RCBD 4 ซ้ำ ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย 2 ปัจจัย ได้แก่ ชุดดิน 5 ชุด ความ

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

เข้มข้นของแคดเมียม 2 ระดับ โดยมีระยะเวลาบ่มดิน 7 ช่วงเวลา (1, 3, 7, 14, 21, 28, และ 60 วัน) พบว่า การบ่มดินในช่วงแรก (วันที่ 1-7) ความเข้มข้นของแคดเมียมมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) แคดเมียมรูปอิสระและรูปที่แลกเปลี่ยนได้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นในทุกชุดดินหลังจากนั้นแคดเมียมรูปอิสระและรูปที่แลก เปลี่ยนลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อบ่มดินนาน 14 วัน ในขณะที่บ่มดินนาน 14-60 วันแคดเมียมกลุ่มที่ไม่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพมีการแพร่กระจายและความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ทั้ง 5 ชุดดินเมื่อเปรียบเทียบกับชุดดินควบคุมแล้วจะเห็นว่าในดินควบคุมจะมีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดในดินที่สามารถพบได้ทั่วไปในดินและส่วนใหญ่พบในรูปที่เหลือจากการสกัด >รูปที่แลกเปลี่ยนได้ >รูปคาร์บอเนต >รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส >รูปอิสระในสารละลายดิน (Bioavailability Cd) และปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total Cd) ค่อนข้างสูง

ปภามญชุ์ ซีประเสริฐ (2555, น.80-81) ได้ศึกษาการปลดปล่อยแคดเมียมในดินนาข้าว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยแคดเมียมจากดินนาข้าว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก พบว่า ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมขึ้นอยู่กับสมบัติของดิน ได้แก่ pH ปริมาณอินทรียวัตถุ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก และปริมาณดินเหนียว เมื่อศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ พบว่าเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับได้แก่ 5 – 6 ชั่วโมง และรูปแบบการดูดซับสอดคล้องกับสมการการดูดซับของ Freundlich $Y = 29.402x0.3872$ โดยการปลดปล่อยของแคดเมียมจะมีมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมมากขึ้น และการปลดปล่อยของแคดเมียมขึ้นอยู่กับระยะเวลาการปนเปื้อนของแคดเมียม โดยในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนนาน แคดเมียมถูกปลดปล่อยออกมาน้อย

ยุทธ์ดนัย ยอดทองดี (2555, น.165) ได้ทำการวิจัยการปลดปล่อยโลหะหนักบางชนิดจากดินที่ผสมเอฟจีดี ยิปซัมด้วยเทคนิคการชะแบบคอลัมน์ โดยการทำการทดลองผสมยิปซัมกับดินแล้วปลูกพืชทดสอบ พบว่า จากการเอาดินผสมไปทดลองปลูกคะน้า และถั่วเขียว เพื่อศึกษาการสะสมของโลหะบางชนิดในพืชคือ ต้นคะน้า และต้นถั่วเขียว พบว่าต้นคะน้ามีการดูดซึมของโลหะหนักเข้าไปในปริมาณที่น้อยมาก ส่วนถั่วเขียวได้ศึกษาในเมล็ดถั่วเขียว พบปริมาณโลหะ ทองแดง และตะกั่ว ถูกเก็บสะสมไว้ในเมล็ดในปริมาณที่ไม่สูงมาก และพบในปริมาณที่ไม่เกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้มีได้ในอาหาร ในขณะที่ตรวจไม่พบ แคดเมียม โครเมียม นิเกิล สารหนู และปรอท ในพืชทั้งสองชนิด จากการทดลองใส่เอฟจีดียิปซัมที่เติมลงไปดินเพื่อปลูกพืช พบว่าสามารถเติมได้ลงไปในปริมาณถึง 5 % ต่อน้ำหนักดิน โดยไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเกิดสะสมปริมาณโลหะหนักในพืชในระดับที่ยอมมีให้ในอาหาร

อภิญญา พิมพ์ทอง (2556, น.68) วิจัยการใช้ไบโอชาร์และจุลินทรีย์ในการลดการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไบโอชาร์ชนิดต่าง ๆ และจุลินทรีย์มาใช้ในการลดการสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียม โดยศึกษาการ

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

ลดการสะสมแคดเมียมในต้นข้าว โดยปลูกข้าวในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม เทียบกับการปลูกข้าวในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมและเติมไบโอชาร์ชนิดต่าง ๆ ชนิดละ 1 % และเติมจุลินทรีย์สายพันธุ์ต่าง ๆ ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 90 วัน พบว่า การเติมไบโอชาร์ช่วยลดการะสะสมแคดเมียมได้ และการเติมไบโอชาร์เถ้าขี้เลื่อยช่วยลดการสะสมแคดเมียมได้มากที่สุด รองลงมาคือไบโอชาร์ชานอ้อย และไบโอชาร์เถ้าแกลบ ตามลำดับ โดยการเติมไบโอชาร์ขี้เถ้าเลื่อย ช่วยลดการสะสมแคดเมียมในต้นข้าว ในราก ลำต้น แกลบ และเมล็ดในปริมาณ 1037 mg/kg 125 mg/kg 34.4 mg/kg และ 4.12 mg/kg ตามลำดับ เนื่องจากไบโอชาร์ขี้เถ้าเลื่อยมีพื้นที่ผิวมาก และมีแร่ธาตุแคลเซียม แมกนีเซียมและซิลิกอนสูง มีผลต่อการลดการสะสมแคดเมียมมากกว่าไบโอชาร์ชนิดอื่น ๆ ส่วนการศึกษาการเติมจุลินทรีย์ในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม พบว่า เชื้อแบคทีเรีย Pseudomonus Aeruginosa มีความสามารถในการลดการสะสมแคดเมียมในต้นข้าวได้ดีที่สุด รองลงมาคือแบคทีเรีย Bacillus Subtilis และเชื้อรา Bacillus Bassiana การเติมจุลินทรีย์ช่วยเพิ่มปริมาณของแคลเซียม แมกนีเซียม ซิลิกอน และน้ำหนักต้นข้าว สูงกว่าในชุดควบคุม

จันทร์เพ็ญ ชุมแสง ณิชารีย์ ใจคำวัง (2558, น.63) ได้ศึกษาสถานะธาตุอาหารและปริมาณแคดเมียมในไร่ยาสูบในระบบเคมีเกษตร จังหวัดสุโขทัย โดยทำการสำรวจการสะสมแคดเมียมในดินพื้นที่ปลูกยาสูบระบบโควตาแบบเคมีเกษตร ทำการศึกษาสมบัติของดินและปริมาณแคดเมียมทั้งหมดและสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ ทั้งหมด 45 ตัวอย่าง ทั้งก่อนและหลังการเพาะปลูก พบว่า ดินในพื้นที่มีความเป็นกรดรุนแรง (pH 3.83 - 5.45) ในขณะที่ปริมาณอินทรียวัตถุ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีปริมาณต่ำ และพบว่าดินมีแคดเมียมทั้งหมดอยู่ในช่วง 3.27-5.08 mg/kg ซึ่งเป็นระดับที่เกินเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนแคดเมียมในดินประเทศไทยของกรมวิชาการเกษตร และสูงกว่าค่าอนุโลมสูงที่สุดที่ยอมให้มีได้ของประชาคมเศรษฐกิจยุโรป สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ พบว่ามีการปนเปื้อนแคดเมียมสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ

ดาวรุ่ง สังข์ทองและวิทยาภรณ์ คงอยู่ (2559, น.295-309) ได้ศึกษารูปฟอร์มของแคดเมียมและตะกั่วในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ โดยวิธีการสกัดลำดับขั้นแบบบีซีอาร์ดัดแปลง ซึ่งมีขั้นตอนการสกัดแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ทำให้สามารถแยกรูปฟอร์มของตะกั่วและแคดเมียมออกเป็นรูปฟอร์มต่าง ๆ ได้แก่ รูปที่ละลายน้ำได้และสกัดได้ด้วยกรดหรือรูปฟอร์มที่แลกเปลี่ยนได้ (EXC) รูปฟอร์มที่ถูกรีดิวซ์ได้ง่าย (RED) รูปฟอร์มที่ถูกออกซิไดซ์ได้ (OXI) และรูปฟอร์มที่เหลือจากการสกัด (RESD) โดยผลการศึกาพบว่าดินปนเปื้อนสังเคราะห์มีลำดับการกระจายตัวของสัดส่วนปริมาณแคดเมียมแตะละรูปฟอร์ม คือ EXC > RED > OXI > RESD โดยแคดเมียมมีแนวโน้มที่จะเกิดการเคลื่อนย้ายและแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายกว่าตะกั่ว

323307754 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

บทที่ 3
ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาอิทธิพลของยิปซัมต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน

เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราการใส่ยิปซัม 3 อัตราต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียม(Cadmium)ในดินทั้งหมด 6 รูป ในระยะเวลาที่แคดเมียมตกค้างในดิน 7 ช่วงเวลา ชุดดินที่ต่างกัน 3 ชุดดินและระดับการปนเปื้อนแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน 2 ระดับ ที่มีผลต่อรูปทางเคมีและการแพร่กระจายของแคดเมียมในดิน โดยมีวิธีการดำเนินการศึกษาดังนี้ โดยมีวิธีการดำเนินการศึกษาดังนี้

สถานที่และระยะเวลาในการทดลอง

ทำการศึกษาในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตัวอย่างดินจากชุดดินที่เป็นตัวแทน 3 ชุดดิน ทำการทดลองโดย บ่มดินในภาชนะพลาสติก โดยมีระยะเวลาในการบ่มทั้งสิ้น 60 วัน ทำการบันทึกข้อมูลและเก็บตัวอย่างดินเมื่อครบกำหนดระยะเวลาการบ่มดินตามช่วงเวลาที่กำหนดไว้ วิเคราะห์ตัวอย่างดินภายในห้องปฏิบัติการ ศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

การวางแผนการทดลองและกรรมวิธีการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ Randomize Complete Block Design (RCBD) มี 4 ซ้ำ ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ตัวแทนกลุ่มชุดดินที่มีเนื้อดินต่างกัน 3 ชุดดิน ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 2 ระดับ ได้แก่ อัตราการปนเปื้อนในดินที่ระดับ 5 และ 30 mg/kg และอัตราการใส่ยิปซัม 3 ระดับ ได้แก่ อัตรา 0, 4 และ 8 % ของน้ำหนักดิน โดยมีช่วงเวลาการบ่มดิน 7 ช่วงเวลา ได้แก่ 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน ดังนั้นจึงมีกรรมวิธีทดลองทั้งสิ้น 18 กรรมวิธี และมีหน่วยทดลองทั้งสิ้น 72 หน่วยทดลอง ซึ่งแต่ละปัจจัยมีรายและเอียดดังนี้

ชุดดินตัวแทน

ชุดดินตัวแทน 3 ชุดดิน ที่เก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่แปลงเพาะปลูกยาสูบ ในพื้นที่ตำบลปากแคว อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย โดยการกำหนดเลือกชุดดินที่มีความแตกต่างกันทางด้านสมบัติทางกายภาพและเคมี เพื่อจะได้เปรียบเทียบความแตกต่างถึงความสามารถในการดูดซับ และการเปลี่ยนรูปทางเคมีขอแคดเมียมในดินที่มีเนื้อดินชนิดต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบในการอธิบายผลของยิปซัมต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน ซึ่งชนิดของดินนั้นส่งผลต่อข้อมูลดังกล่าว ชุดดินที่ใช้ในการศึกษาจึงจำเป็นต้องมีความแตกต่างกันทางด้านกายภาพ ได้แก่ ดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty

URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

Clay), ดินร่วน (Loam) และดินร่วนปนทราย (Sandy Loam) โดยใช้ กลุ่มชุดที่ 7, กลุ่มชุดดินที่ 38 และกลุ่มชุดดินที่ 56 เป็นชุดดินตัวแทน

อัตราการใส่ยิปซัม

อัตราการใส่ยิปซัมในดิน 3 ระดับ ได้แก่ อัตรา 0, 4 และ 8 % ของน้ำหนักดินแห้ง (SWD) ซึ่งอัตราการใส่ยิปซัมพิจารณาจากความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน และความต้องการยิปซัมของดิน โดยใช้ยิปซัมจากกระบวนการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งเป็นยิปซัมสังเคราะห์ เตรียมโดยนำมาตากให้แห้งในที่ร่ม จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2 mm. เก็บสิ่งเจือปนออกและเก็บในถุงพลาสติกที่ปิดสนิทสำหรับเตรียมหน่วยทดลอง

ระดับการปนเปื้อนแคดเมียมในดิน

ทดสอบระดับการปนเปื้อนแคดเมียมในดิน 3 ระดับ ได้แก่ ระดับความเข้มข้นในดินที่ 0, 5, 30 mg/kg ซึ่งเป็นตัวแทนพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมในระดับต่ำ และตัวแทนพื้นที่ทีมีการปนเปื้อนแคดเมียมสูง

วิธีการดำเนินการศึกษา

การเตรียมดิน

สุ่มเก็บตัวอย่างดิน กลุ่มชุดที่ 7, กลุ่มชุดดินที่ 38 และกลุ่มชุดดินที่ 56 ซึ่งเป็นตัวแทนชุดดินที่มีเนื้อดินต่างกันที่ไม่มีรายงานการปนเปื้อนแคดเมียม จากพื้นที่เกษตรกรรมที่มีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนแคดเมียมอันเนื่องมาจากกิจกรรมมนุษย์ และเก็บดินตัวแทนที่มีการปนเปื้อนจากแปลงปลูกยาสูบพื้นที่ ตำบลปากแคว อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัยโดยสุ่มเก็บตัวอย่างดินจากแปลงเพาะปลูกของเกษตรกร กระจายให้ครอบคลุมทั่วแต่ละแปลง ๆ ละ 15-20 จุด ขุดหลุมเป็นรูป V ให้ลึกในแนว ดิ่งประมาณ 0-20 เซนติเมตร นำมาตากให้แห้งในที่ร่ม ทุบให้แตก จากนั้นร่อนผ่านตระแกรงร่อนขนาด 2 mm. และเก็บเศษอินทรีย์ออก แบ่งดินเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกสำหรับวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินและปริมาณแคดเมียมในดินเริ่มต้น และส่วนที่สองสำหรับใช้เตรียมหน่วยทดลอง

การเตรียมสารละลายแคดเมียมที่เติมลงดิน

โดยใช้แคดเมียมคลอไรด์ ($CdCl_2$) ความบริสุทธิ์ 99.5 % ทำการชั่งน้ำหนักสารประกอบแคดเมียมคลอไรด์ ให้ได้ตามสัดส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 5 และ 30 mg/kg SDW (Soil Dry Weight) โดยคำนวณจากน้ำหนักดิน 400 g (น้ำหนักดินแห้ง) โดยเตรียมสารละลายแคดเมียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 100 mg Cd/L ในน้ำที่ปราศจากไอออน (DI

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

Water) เก็บสารละลายในขวดโพลีเอทีลีน เพื่อป้องกันการสลายตัวของสารละลายแคดเมียมจากแสงแดด ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

การเตรียมยิปซัม

ในการทดลองนี้ใช้ยิปซัมที่ได้จากกระบวนการกำจัดกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งเป็นยิปซัมสังเคราะห์ นำมาตากให้แห้งในที่ร่ม จากนั้นร่อนผ่านตระแกรงร่อนขนาด 2 mm. และเก็บเศษสิ่งปนออก และเก็บไว้ถุงพลาสติกที่ปิดสนิทสำหรับใช้เตรียมหน่วยทดลอง โดยทำการชั่งให้ได้น้ำหนักตามอัตราส่วนที่กำหนด ซึ่งคำนวณจากน้ำหนักดินที่ใช้ทดลอง

การเตรียมหน่วยทดลองและการบ่มดิน

ชั่งดินตัวแทนทั้งสามชุดินที่ผ่านการผึ่งแห้งและร่อนผ่านตระแกรงร่อนขนาด 2 mm. น้ำหนัก 400 g เทตัวอย่างดินลงบนแผ่นพลาสติกโดยเกลี่ยตัวอย่างดินให้มีความหนาประมาณ 1 cm. ให้สม่ำเสมอ จากนั้นใส่ยิปซัมที่ผ่านกระบวนการเตรียมแล้วในอัตรา 0, 4 และ 8 % ของน้ำหนักดิน (ใส่ยิปซัม 0, 16, และ 32 g ตามลำดับ) โดยใส่ให้สม่ำเสมอ แล้วผสมคลุกเคล้าให้สวนผสมเข้ากัน หลังจากนั้นใส่สารละลายแคดเมียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 50 mL และ 300 mL ซึ่งสามารถเทียบได้กับตัวอย่างดินที่จะมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินที่มีความเข้มข้น 5 และ 30 mg/kg โดยเติมสารละลายแคดเมียมให้ทั่วตัวอย่างดินและสม่ำเสมอ จากนั้นทำการผสมคลุกเคล้าให้เข้ากัน และเทตัวอย่างดินที่ใส่แคดเมียมแล้วเก็บไว้ในถุงพลาสติกและปิดให้สนิททิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้แคดเมียมแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอในตัวอย่างดินเพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง หลังจากนั้นนำตัวอย่างดินของแต่ละกรรมวิธีไปผึ่งให้แห้งในที่ร่มและร่อนผ่านตระแกรงร่อนขนาด 0.5 mm. อีกครั้งและชั่งตัวอย่างดินน้ำหนัก 40 g บรรจุลงในภาชนะพลาสติกและเติมน้ำปราศจากไอออน (DI Water) เพื่อปรับความชื้นของดินตัวอย่างที่ 50 % ของความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน (Water Holding Capacity :WHC) ชั่งน้ำหนักหน่วยทดลองทุกหน่วยแล้วนำไปบ่อมในตู้บ่ม (Incubator) ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 1 °C เป็นเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน เมื่อครบกำหนดเวลาบ่มดิน นำตัวอย่างดินมาสกัดตามลำดับขั้นตามวิธีสกัดลำดับขั้น

การควบคุมดูแลคลอดการทดลอง

การทดลองโดยวิธีบ่มดินนี้จำเป็นต้องมีการรักษาระดับความชื้นของดินให้คงที่ตามกรรมวิธีตลอดการทดลอง โดยทำการตรวจวัดความชื้นทุก 3 วัน ซึ่งจะสุ่มหน่วยทดลองจากดินทั้ง 3 ชุด มา 3 หน่วยทดลองจากแต่ละอัตราการใส่ยิปซัม นำหน่วยทดลองนั้นมาชั่งน้ำหนักที่หายไปเพื่อตวงน้ำกลั่นเป็นปริมาตร (mL) ตามน้ำหนักที่หายไป ซึ่งการตรวจสอบความชื้นของหน่วยทดลองจะทำวันเว้นวันสลับกับการปรับความชื้นให้กับหน่วยทดลอง

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

การเก็บตัวอย่างดินหน่วยทดลอง

ทำการเก็บตัวอย่างดินจากหน่วยทดลองเพื่อนำมาสกัดตามวิธีการสกัดลำดับขั้น เมื่อครบกำหนดระยะเวลาการบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน โดยเก็บตัวอย่างดินจากหน่วยทดลองที่ครบกำหนดระยะเวลาการบ่มของแต่ละชุดดินทดลองไปผึ่งให้แห้งในที่ร่ม แล้วบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตระแกรงขนาด 0.5 mm. พร้อมเก็บรักษาตัวอย่างในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท เพื่อจะนำตัวอย่างไปเข้าห้องปฏิบัติการในกระบวนการสกัดลำดับขั้นต่อไป

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์รูปทางเคมีของแคดเมียมในดินของแต่ละชุดดินทดลองที่มีการเก็บตัวอย่างดินในช่วงเวลาต่าง ๆ ตลอดระยะการทดลอง มาสกัดรูปทางเคมีของแคดเมียมตามวิธีการสกัดลำดับขั้นของ Tessier (1979) และตรวจวัดปริมาณรูปทางเคมีของแคดเมียมแต่ละรูปแล้วนั้นนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis Of Variance) วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติแบบสองปัจจัย (Two - Way ANOVA) เพื่อหาอิทธิพลของปัจจัยหลักคือ อัตราการใส่ยิปซัม, อัตราการปนเปื้อนแคดเมียมและชุดดิน เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปัจจัยด้วยวิธี t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($p<0.05$) ใช้การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Least Significant Difference (LSD) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในแต่ละรูปทางเคมีและค่า pH ของดินตามช่วงระยะเวลาด้วยค่าสหสัมพันธ์ (Correlation)

การสกัดลำดับขั้น (Sequential Extraction)

ดำเนินการตามขั้นตอนการสกัดลำดับขั้นตามวิธีของ Tessier (1979, p.846) โดยนำดินที่ผ่านการทดลองมาทำการสกัดตามลำดับขั้นเพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปทางเคมีของแคดเมียมทั้ง 6 รูป ได้แก่ รูปอิสระในสารละลายดิน (Water Soluble), รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable), รูปคาร์บอเนต (Carbonate-Bound), รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn Oxide-bound) รูปอินทรีย์ (Organic-Bound) และรูปที่คงเหลือจากการสกัด (Residue) โดยเริ่มจากการชั่งตัวอย่างดิน 1.000 กรัม จากแต่ละกรรมวิธีใส่ในหลอดเซนทริฟิวส์ ขนาด 50 mL และดำเนินการสกัดตามลำดับขั้นดังนี้

1. แคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดิน (Water Soluble Cd Fraction: SLU) ทำการสกัดด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized Water, DI) 15 mL เขย่าอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และดำเนินการแยกส่วนโดยทำให้ดินตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงตะกอนอุณหภูมิต่ำแล้วกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 5 และเก็บรักษาสารละลายที่สกัดได้ในขวดพลาสติก

2. แคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Cd Fraction; EXC) นำตะกอนส่วนที่เหลือจากการสกัดแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินมาสกัดอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้อง โดยเติมสารละลาย $MgCl_2$ ที่มีความเข้มข้น 1 mol /dm^3 (pH 7) จำนวน 8 mL เขย่าอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงและและดำเนินการแยกส่วนโดยทำให้ดินตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงตะกอนอุณหภูมิต่ำแล้วกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 5 และเก็บรักษาสารละลายที่สกัดได้ในขวดพลาสติก

3. แคดเมียมในรูปคาร์บอเนต (Carbonate-Bound Cd; CA) นำตะกอนส่วนที่เหลือจากการสกัดแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ มาสกัดอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้อง โดยเติมสารละลาย NaO $(CH_3COO)_2$ ที่มีความเข้มข้น 1 mol/dm^3 ที่ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 5 ด้วย CH_3COOH (Acetie Acid; HOAc) จำนวน 8 mL เขย่าอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง และดำเนินการแยกส่วนโดยทำให้ดินตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงตะกอนอุณหภูมิต่ำแล้วกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 5 และเก็บรักษาสารละลายที่สกัดได้ในขวดพลาสติก

4. แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe/Mn Oxides-Bound Cd; Fe-Mn) นำตะกอนดินส่วนที่เหลือจากการสกัดแคดเมียมรูปคาร์บอเนต มาสกัดอย่างต่อเนื่องด้วยการเติมสารละลาย NH_2OH-HCl ความเข้มข้น 0.04 mol/dm^3 จำนวน 20 mL ใน 25 % (v/v) ของ CH_3COOH โดยดำเนินการทดลองใน Water Bath ที่ควบคุมอุณหภูมิ 96±3 °C พร้อมเขย่าอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และดำเนินการแยกส่วนโดยทำให้ดินตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงตะกอนอุณหภูมิต่ำแล้วกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 5 และเก็บรักษาสารละลายที่สกัดได้ในขวดพลาสติก

5. แคดเมียมในรูปอินทรีย์ (Organic-Bound Cd; OM) นำตะกอนดินส่วนที่เหลือจากการสกัดแคดเมียมในรูปของเหล็กและแมงกานีสมาสกัดอย่างต่อเนื่อง โดยขั้นตอนดังนี้ ขั้นแรก เติมสารละลาย HNO_3 ความเข้มข้น 0.02 mol/dm^3 จำนวน 3 mL และสารละลาย 30% H_2O_2 ที่ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 2 ด้วยกรด HNO_3 จำนวน 5 mL ผสมให้เข้ากันและดำเนินการต้มในหม้อต้ม (Water Bath) ที่ความคุมอุณหภูมิ 85 ± 2 °C พร้อมเขย่าอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขั้นตอนที่ 2 เติมสารละลาย 30% H_2O_2 (ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 2 ด้วยกรด HNO_3) จำนวน 3 mL หลังจากนั้นดำเนินการต้มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 85±2 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นและเติมสารละลาย NH_4OAc ความเข้มข้น 3.2 mol/dm^3 ใน 20% (v/v) ของกรด HNO_3 จำนวน 5 mL และเขย่าอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที และดำเนินการแยกส่วนโดยทำให้ดินตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงตะกอนอุณหภูมิต่ำแล้วกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 5 และเก็บรักษาสารละลายที่สกัดได้ในขวดพลาสติก

6. แคดเมียมรูปเหลือจากการสกัด (Residual Cd Fraction; RES) นำตะกอนดินส่วนที่เหลือจากการสกัดแคดเมียมออร์แกนิก มาย่อยด้วยกรด HNO_3 : $HClO_4$ ที่อัตราส่วนผสม HNO_3 :

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

$HClO_4$ เท่ากับ 2:1 จำนวน 8 mL โดยดำเนินการย่อยด้วยเครื่อง Microwave Digest ที่ควบคุมอุณหภูมิ 170 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 5 และเก็บรักษาสารละลายที่สกัดได้ในขวดพลาสติก

หลังจากการสกัดในแต่ละลำดับขั้น จะแยกส่วนโดยการทำให้ตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงตะกอนอุณหภูมิต่ำที่ระดับความเร็ว 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นกรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง Whatman No. 5 ส่วนที่คงเหลือของแคดเมียมในแต่ละรูปทางเคมีที่ผ่านการสกัดในแต่ละลำดับขั้นของการสกัด ทำการล้างดินตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI Water) ด้วยการเขย่าดินตะกอน และตามด้วยการทำให้ดินตกตะกอนด้วยเครื่องเหวี่ยงตะกอนอุณหภูมิต่ำแล้วกรองตัวอย่างอีกครั้ง ก่อนจะดำเนินการในรูปทางเคมีถัดไป ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมในแต่ละรูปทางเคมีที่ทำการสกัดได้ นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Flame Atomic Absorption Spectrophotometer (FAAS) ซึ่งลำดับของการสกัดตามวิธีของ Tessier (1979, p.846) แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ขั้นตอนการสกัดลำดับขั้น

Step	Chemical form	Extractant	Procedure
1	Water soluble Cd	DI water 15 mL	Shake 2 hr
2	Exchangeable Cd	$MgCl_2$ 1 mol/dm^3 (pH 7) 8 mL	Shake 1 hr
3	Carbonate-bound Cd	$NaO(CH_3COO)_2$ 1 mol/dm^3 (pH 5) 10 mL	Shake 5 hr
4	Fe/Mn Oxides-bound Cd	NH_2OH-HCl 0.04 mol/dm^3 20 mL	Shake in Water Bath at 96±3 °C 6 hr
5	Organic-bound Cd	1) HNO_3 0.02 mol/dm^3 3 mL and 30% H_2O_2 (pH 2 by HNO_3) 5 mL	Shake 2 hr in Water Bath at 85 ± 2 °C
		2) 30% H_2O_2 (pH 2 by HNO_3) 3 mL	Boil in Water Bath 3 hr at 85±2 °C
		3) NH_4OAc 3.2 mol/dm^3 (in 20% v/v HNO_3) 5 mL	Shake 30 min
6	Residual Cd	HNO_3 :$HClO_4$ = 2:1 8 mL	2 hr Microwave Digest at 170 °C

ที่มา : จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2552, น.68-69

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินทดลอง

วิเคราะห์ปฏิกิริยาดิน (pH) โดยใช้เครื่อง pH Meter โดยใช้ดิน 10 g ต่อน้ำกลั่นปริมาตร 25 mL (ใช้อัตราส่วนดิน : น้ำ = 1 : 2.5) คนให้เข้ากันเป็นครั้งคราวจนครบ 30 นาที แล้ววัดค่าด้วยเครื่อง pH Meter โดยจะทำการวัดค่า pH ของดินที่ผ่านการบ่มตามช่วงระยะเวลา

ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (OM) โดยนำตัวอย่างดินที่ผ่านการผึ่งแห้งในที่ร่ม บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 mm. แล้วนำดินไปหาปริมาณอินทรียวัตถุในดินทั้งหมดโดยวิธี Wet Oxidation ของ Walkley and Black

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) วิเคราะห์โดยชั่งดิน 5 g แล้วนำมาแช่ด้วย NH_4OAc (pH 7) ปริมาตร 50 mL เป็นเวลา 1 คืน จากนั้นถ่ายตัวอย่างดินใส่กรวยกรองที่รองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5 แล้วทำการชะประจุที่เหลือด้วยเอธานอล แล้วชะต่อด้วย 10 % Acidified NaCl ทีละน้อยให้ได้สารละลายปริมาตรเกือบ 100 mL สารละลายส่วนนี้เก็บไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน โดยนำไกลั่นเหมือนกับการหาไนโตรเจน

เนื้อดิน (Soil Texture) นำตัวอย่างดินที่ผึ่งแห้งบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm. ชั่งน้ำหนักแล้วกำจัดอินทรียวัตถุด้วย H_2O_2 ทำการวิเคราะห์โดยวิธีใช้สาร Calgon นำไปปั่นรวมกับดินในกระบอกตวงแล้ววัดโดย Pipette Method แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ Sand, Silt และ Clay ตามลำดับ

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

สมบัติดินที่ใช้ในการทดลอง

จากการคัดเลือกชุดดินตัวแทนเพื่อเป็นปัจจัยในการศึกษาถึงผลกระทบของสมบัติดินที่มีต่อการการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน โดยพิจารณาจากเนื้อดินที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการคัดเลือดชุดดินดังกล่าว ได้คัดเลือกตัวแทนชุดดินมา 3 ชนิด ที่มีเนื้อดินต่างกัน ได้แก่ ดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty Clay) ดินร่วน (Loam) และดินร่วนปนทราย (Sandy Loam) โดยใช้กลุ่มชุดดินที่ 7 กลุ่มชุดดินที่ 38 และกลุ่มชุดดินที่ 56 เป็นชุดดินตัวแทนในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อรูปทางเคมีในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพของแคดเมียม และการประเมินสมบัติทางกายภาพและและทางเคมีของดินเบื้องต้น ได้อาศัยเกณฑ์มาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร เป็นมาตรฐานในการอธิบายผลการศึกษาสมบัติดินที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งผลการศึกษาสมบัติดิน เป็นดังนี้

สมบัติทางกายภาพของดิน

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของดินตัวแทนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แสดงในตารางที่ 6 พบว่าชุดดินตัวแทนมีปริมาณองค์ประกอบของเนื้อดินที่ต่างกัน โดยมีปริมาณดินทรายอยู่ในช่วง 29.34 – 65.96 % ปริมาณดินร่วนและดินเหนียวอยู่ในช่วง 18.04-54.27 % และ 16.71-38.16 % ตามลำดับ โดยกลุ่มชุดดินที่ 7 ซึ่งเก็บตัวอย่างดินจากนาข้าวมีลักษณะเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง (Clay 38.16 %, Silt 32.5 %, Sand 29.34 %) ชุดดินที่ 38 ที่เก็บตัวอย่างดินจากแปลงปลูกพืชไร่มีลักษณะเป็นดินร่วน (Clay 17.27 %, Silt 43.12%, Sand 39.61%) และ ชุดดินที่ 56 ที่เก็บตัวอย่างดินจากแปลงปลูกข้าวโพดและมันสำปะหลังมีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย (Clay 16.71 %, Silt 18.04 %, Sand 65.96%) จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ พบว่าดินที่จะนำมาทดลองในห้องปฏิบัติการมีลักษณะเนื้อดินที่แตกต่างกัน คาดได้ว่าเนื้อดินที่ต่างกันจะมีผลต่อการดูดซับ การเคลื่อนย้าย และการแพร่กระจายของความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปทางเคมีต่าง ๆ ในดิน เนื่องจากแต่ละชุดดินมีปริมาณดินเหนียวที่ต่างกัน ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับรูปเคมีของแคดเมียมในดิน (จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2552, น.87)

สมบัติทางเคมีของดิน

จากการวิเคราะห์สมบัติดินทางเคมีพบว่า ชุดดินที่นำมาทดลองมีสมบัติทางเคมีที่ต่างกัน ดังนี้ กลุ่มชุดดินที่ 7 มีค่า pH เท่ากับ 6.22 มีระดับเป็นกรดอ่อน กลุ่มชุดดินที่ 38 มีค่า pH เท่ากับ

323077542 URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

5.71 มีสภาพเป็นกรดปานกลาง กลุ่มชุดดินที่ 56 มีค่า pH เท่ากับ 6.50 มีสภาพเป็นกรดอ่อน จะเห็นว่าชุดดินตัวแทนที่นำมาทดลองนี้ มีค่า pH ของดินอยู่ในระดับที่มีความเป็นความเป็นกรด ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในการปลูกพืชแบบเชิงเดี่ยวและการใช้ปุ๋ยเคมีติดต่อกันมาเป็นเวลานานและต่อเนื่องของพื้นที่ปลูกยาสูบ มีผลทำให้โครงสร้างดินเกิดการเปลี่ยนแปลงและค่าความเป็นกรด-ด่างของดินลดลง จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่า ชุดดินตัวแทน โดยเฉพาะชุดดินที่ 38 มีค่า pHของดินมีความเป็นกรดสูงกว่าดินอีก 2 ชนิด จึงอาจทำให้แคดเมียมในชุดดินที่ 38 สามารถละลายออกมาอยู่ในรูปอิสระในสารละลายดินได้สูงกว่าชุดดินตัวแทนชุดอื่น

ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) เป็นปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญต่อการดูดซับแคดเมียมให้อยู่ในรูปสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นรูปที่จุลินทรีย์ในดินและพืชไม่สามารถดูดซับไปสะสมได้ นอกจากนั้นยังเป็นปัจจัยบ่งชี้ถึงความอุดมสมบูรณ์ของดินอีกปัจจัยหนึ่ง พบว่า ชุดดินทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณอินทรียวัตถุในดินที่ต่างกัน ซึ่งชุดดินที่ 38 มีปริมาณอินทรียวัตถุมากที่สุด (1.46 %) รองลงมาคือกลุ่มชุดดินที่ 7 (1.14 %) และกลุ่มชุดดินที่ 56 (0.44 %) ตามลำดับ

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) เป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของดิน พบว่า ตัวแทนชุดดินที่นำมาศึกษามีระดับค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่ต่างกัน โดยกลุ่มชุดดินที่ 7 และ กลุ่มชุดดินที่ 38 มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอยู่ในระดับสูง ดินมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 22.74 cmol/kg และ 21.13 cmol/kg ตามลำดับ ขณะที่ ชุดดินกลุ่มที่ 56 มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ โดยมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 10.76 cmol/kg แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับประจุแคดเมียมของตัวแทนชุดดินที่แตกต่างกัน ซึ่งพบว่า กลุ่มชุดดินที่ 7 และกลุ่มชุดดินที่ 38 มีระดับค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอยู่ในระดับสูง ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าในชุดดินทั้ง 2 ชนิดสามารถดึงดูดประจุบวกของแคดเมียมให้ยึดเกาะกับอนุภาคเม็ดดินได้สูง (จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2552, น.71) แต่อย่างไรก็ตามการทราบเพียงผลของการดูดซับแคดเมียมในดินเพียงอย่างเดียวนั้น ยังไม่สามารถที่จะอธิบายถึงการแพร่กระจายตัวของแคดเมียมที่ถูกดูดซับเอาไว้ได้

ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในดินตัวแทน 3 ชนิด ของพื้นที่ที่มีกิจกรรมการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อการเกษตรในการปลูกยาสูบที่ต่างกัน อีกทั้งมีเส้นทางของแหล่งที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนแคดเมียมในดินที่ต่างกัน พบว่า ชุดดินตัวแทนทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณแคดเมียมในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (Bioavailability Cd) อยู่ในช่วง 0.16-0.62 mg/kg และปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total Cd) มีค่าอยู่ในช่วง 0.50-1.65 mg/kg พบว่า ตัวแทนชุดดินทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินมีค่าเกินระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนแคดเมียมในดินประเทศไทยที่กำหนดไว้เท่ากับ 0.15 mg/kg แต่ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินตัวแทนมีค่าต่ำกว่าค่าอนุโลม

323077542 URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

สูงสุดที่ยอมให้มีได้ของประชาคมเศรษฐกิจยุโรป (3.0 mg/kg) อย่างไรก็ตามในพื้นที่ปลูกยาสูบแบบเคมี อาจมีการใช้สารเคมีทางการเกษตร ปุ๋ยฟอสเฟสที่ซึ่งวัตถุดิบที่นำมาใช้ทำปุ๋ยอาจมีการปนเปื้อนแคดเมียม (Zarcinas et al., 2004, p.355) และการใช้สารเคมีกลุ่มฆ่าเชื้อราในพื้นที่เพาะปลูก รวมถึงการใช้ปุ๋ยอินทรีย์หรือกากตะกอนน้ำเสียในพื้นที่ติดจ่อกันเป็นเวลานาน อาจส่งผลให้ดินมีการสะสมแคดเมียมมากขึ้น (Liphadzi and Kirkham, 2006, p.172) ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตัวแทนจากพื้นที่ปลูกยาสูบ โดยเฉพาะชุดดินที่ 38 (ดินตัวแทนจากแปลงยาสูบแบบโควตา) อยู่ในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพถึง 38 % ของปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มากที่สุดในชุดดินตัวแทนที่เก็บมาวิเคราะห์ครั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากสภาพชุดดินดังกล่าวมีค่า pH ในระดับที่เป็นกรดปานกลางซึ่งเอื้อต่อการละลายของแคดเมียมในดินให้อยู่ในรูปอิสระในสารละลายดินได้มากกว่า ชุดดินตัวแทนอื่น นอกจากนี้การปลดปล่อยแคดเมียมยังขึ้นกับระยะเวลาที่แคดเมียมปนเปื้อนอยู่ในดิน (ปภามญชุ์ ชีประเสริฐและคณะ, 2554, น.285)

จากการประเมินสมบัติของดินทั้งสามชุดดิน พบว่าดินแต่ละชุดดินแต่ละชุดมีสมบัติที่ต่างกันทั้งทางกายภาพและเคมี ซึ่งสมบัติดินที่ต่างกันนี้จะมีผลต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมในดินมีความต่างกันด้วย สมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน มีบทบาทสำคัญต่อสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพของแคดเมียมต่อสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดิน ที่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียมในดิน และจะส่งผลต่อความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดิน ซึ่งค่า pH ของดินที่เพิ่มขึ้นจะไปลดความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายดิน และส่งผลให้สิ่งมีชีวิตในดินมีการสะสมหรือดูดไปสะสมในส่วนต่าง ๆได้น้อยลง (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540, น.261) และปริมาณดินเหนียวมีอิทธิพลต่อการช่วยลดความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Vig et al., 2003, p.124) และยังพบว่าชุดดินตัวแทนที่นำมาทดลองนี้มีปริมาณความเข้มเข้นของแคดเมียมทั้งหมดในดินที่ต่างกัน เนื่องจากมีการใช้ประโยชน์ที่ดินในลักษณะที่ต่างกัน และจะเห็นได้ว่า ในชุดดินทั้ง 3 ชนิด มีสัดส่วนของปริมาณแคดเมียมในรูปที่เป็นประโยชน์ที่ต่างกัน ดังตารางที่ 5

323307754 2 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 5 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง

คุณสมบัติ	ชุดดินที่ 7	ชุดดินที่ 38	ชุดดินที่ 56	ยิปซัม	ยิปซัม[1]	วิธีการวิเคราะห์
pH (ดิน:น้ำ = 1:2.5)	6.22	5.71	6.50	8.08	7.2	pH meter
OM %	1.14	1.46	0.44	-	-	Wet Oxidation
CEC (cmol/kg)	22.74	17.13	9.76	-	-	Ammonium Saturation
Particle – size						
Sand (> 0.05 mm.)	29.34	39.61	65.96	-	-	
Silt (0.002-0.05 mm.)	32.5	43.12	18.04	-	-	
Clay (<0.002 mm.)	38.16	17.27	16.71	-	-	
Soil texture	Silty Clay	Loam	Sandy Loam	-	-	Pipette Method
Available Cd (mg/kg)	0.162	0.62	0.160	ไม่พบ	-	$MgCl_2$ Extraction
Total Cd (mg/kg)	0.69	1.65	0.50	0.057	< 0.02	EDTA Extraction

[1] ที่มา: รัชดาภรณ์ ปันทะรส, 2555, น.8

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่แตกต่างกันตามช่วงเวลาหลังใส่ยิปซัมและแคดเมียมในดิน 3 ชนิด

หลังใส่ยิปซัมในดินทั้งสามชนิด ได้แก่ ดินร่วนเหนียว ดินร่วน และดินร่วนทราย ในอัตรา 0, 4 และ 8 % ของน้ำหนักดิน และเติมสารละลายแคดเมียม ($CdCl_2$) ที่อัตราการปนเปื้อนแคดเมียม 5 และ 30 mg/kg โดยใช้ชุดดินตัวอย่าง 3 ชนิดดินเป็นตัวแทน ในช่วงเวลาต่าง ๆ คือ 1, 3, 7, 14, 21, 28, และ 60 วัน พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปทางเคมี ทั้ง 6 รูป ได้แก่ รูปอิสระในสารละลายดิน (SLU) รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (EXC) รูปคาร์บอเนต (CA) รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn) รูปออร์แกนิก (OM) และรูปที่เหลือจากการสกัด (RES) มีการแพร่กระจายในดินที่แตกต่างกันในดินแต่ละชนิด ที่มีและไม่มีการผสมยิปซัมต่างกันตามช่วงเวลา ซึ่งสามารถเห็นการเปลี่ยนความเข้มขนของแคดเมียมในรูปทางเคมีต่าง ๆ ในดินทั้ง 3 ชนิด ที่มีและไม่มีการผสมยิปซัมได้จากดังแสดงในภาพที่ 2 และได้แสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นของแคดเมียมในแต่ละชุดดินและรูปทางเคมีของแคดเมียมในดินทั้ง 3 ชนิด ที่อัตราการผสมยิปซัม 0, 4 และ 8 % ของน้ำหนักดินและระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 และ 30 mg/kg ในตารางที่ 6

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

การเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน

จากภาพที่ 2 (ก) และ 2 (ข) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินร่วนเหนียวตามช่วงเวลาพบว่า ในรูปอิสระในสารละลายดินทุกชุดดินแคดเมียมมีปริมาณความเข้มข้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 14 วันแรกของการบ่มดิน จากนั้นอัตราการลงลงของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินมีอัตราลดลง แต่ยังลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่มและมีแนวโน้มจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.06 mg/kg คิดเป็น1.26% (ลดลงจาก 0.11 mg/kg เหลือ 0.05 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินหลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.22 mg/kg คดเป็น 4.48% (ลดลงจาก 0.40 mg/kg เหลือ 0.17 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.19 mg/kg คิดเป็น 3.83% (ลดลงจาก 0.40 mg/kg เหลือ 0.21 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.18 mg/kg คิดเป็น 0.61% (ลดลงจาก 4.26 mg/kg เหลือ 4.07 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน มีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.70 mg/kg คิดเป็น 2.33% (ลดลงจาก 4.64 mg/kg เหลือ 3.94 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน มีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.20 mg/kg คิดเป็น 0.85% (ลดลงจาก 4.76 mg/kg เหลือ 4.51 mg/kg)

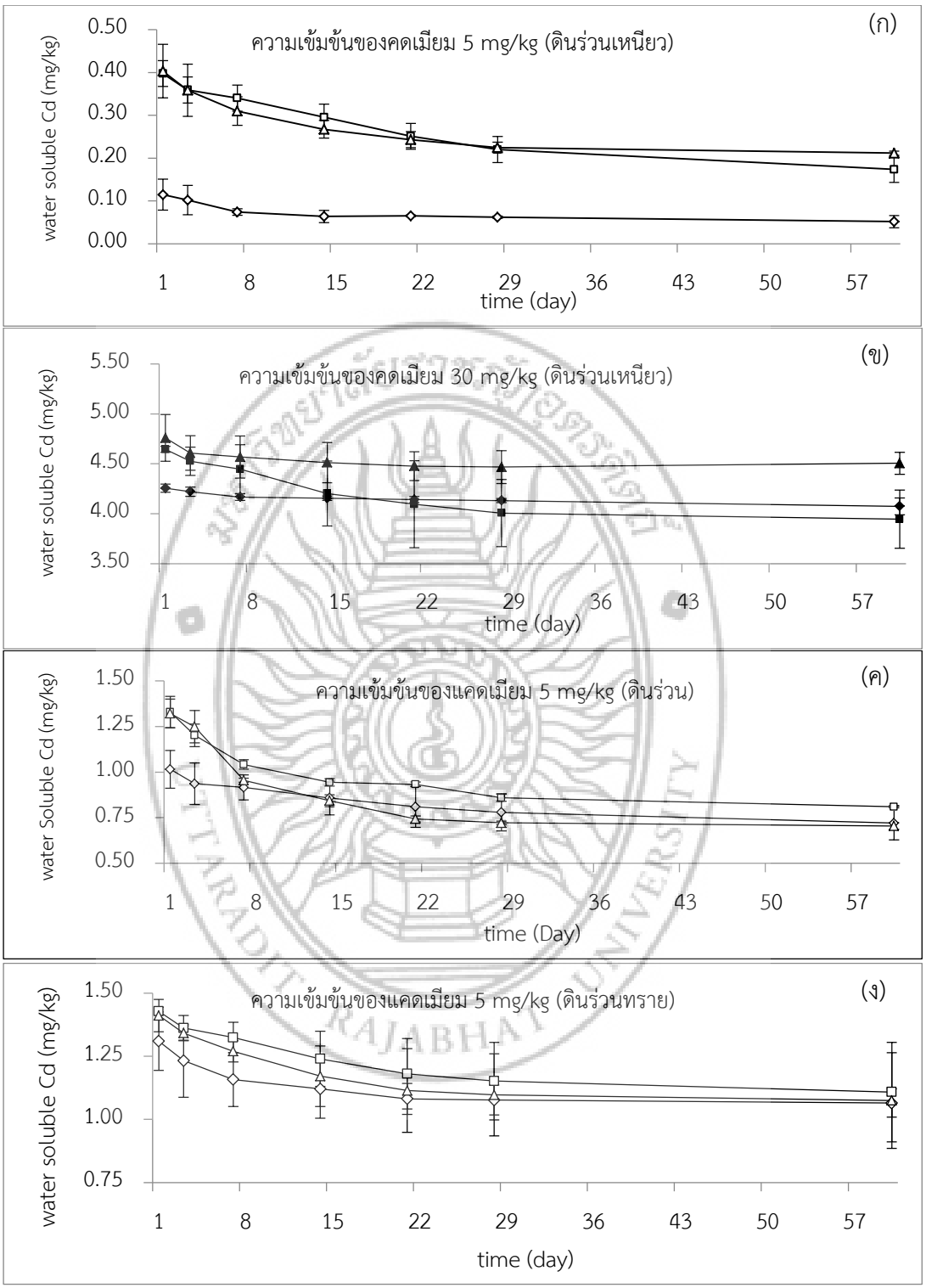
จากภาพที่ 2 (ค) และ 2 (ง) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินร่วนตามช่วงเวลา พบว่า ในทุกชุดดินแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินมีปริมาณความเข้มข้นลงลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 14 วันแรกของการบ่มดิน และยังลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 60 ของการบ่มโดยมีแนวโน้มจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.30 mg/kg คิดเป็น 6.00% (ลดลงจาก 1.02 mg/kg เหลือ 0.72 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.52 mg/kg คิดเป็น 10.40% (ลดลงจาก 1.33 mg/kg เหลือ 0.81 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดินมีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.61 mg/kg คิดเป็น 12.20% (ลดลงจาก 1.32 mg/kg เหลือ 0.71 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.26 mg/kg คิดเป็น 0.87% (ลดลงจาก 10.29 mg/kg เหลือ 10.03

323077542 URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน มีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 1.02 mg/kg คิดเป็น 3.40% (ลดลงจาก 11.61 mg/kg เป็น 10.59 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน มีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 1.23 mg/kg คิดเป็น 1.77% (ลดลงจาก 11.78 mg/kg เหลือ 10.55 mg/kg) ซึ่งจาการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่าที่อัตราความเข้มข้น 5 mg/kg การกระจายตัวของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินนั้นไม่มีความแตกต่างกัน แต่ที่อัตราความเข้มข้น 30 mg/kg ในชุดดินที่ใส่ยิปซัมมีผลให้แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินมีปริมาณความเข้มข้นสูงกว่าชุดดินควบคุม ดังแสดงในภาพที่ 2 (ค) และ 2 (ง) และตารางที่ 6

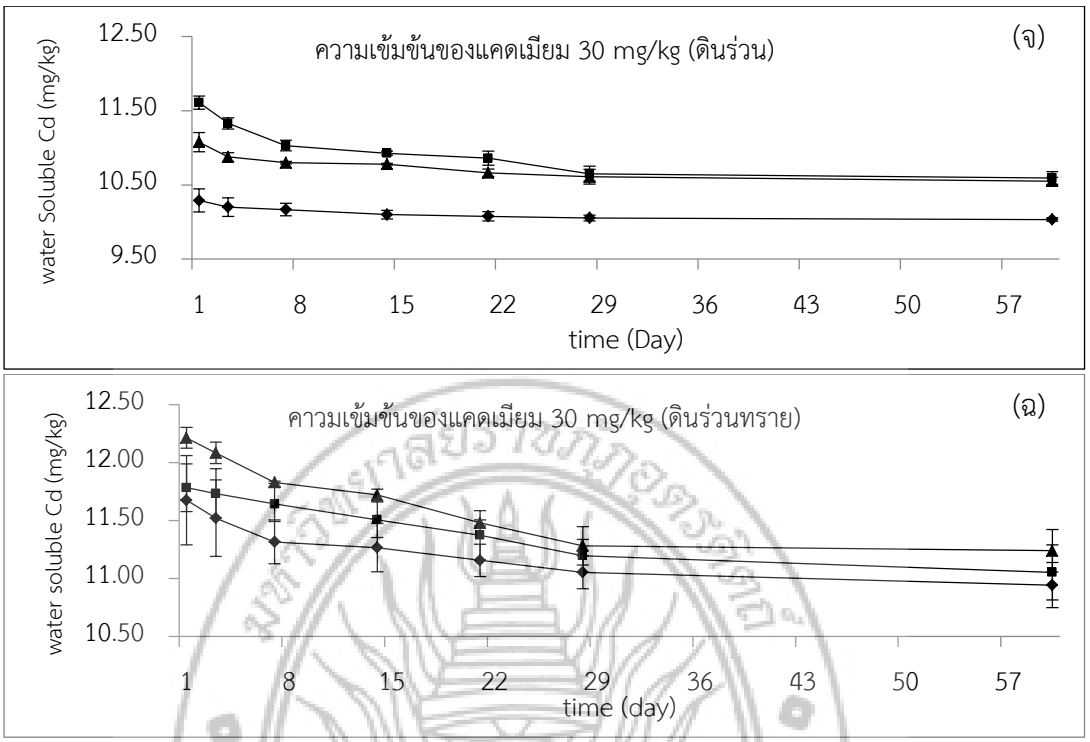
นอกจากนั้น จากภาพที่ 2 (จ) และ 2 (ฉ) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินร่วนทรายตามช่วงเวลาพบว่า ในทุกชุดดินแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินมีปริมาณความเข้มข้นลงลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 14 วันแรกของการบ่มดิน จากนั้นอัตราการลงลงของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินมีอัตราลดลง แต่ยังลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่ม ซึ่งที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.25 mg/kg คิดเป็น 4.91% (ลดลงจาก 1.31 mg/kg เหลือ 1.06 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินมีปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.32 mg/kg คิดเป็น 0.6.41% (ลดลงจาก 1.41 mg/kg เหลือ 1.11 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน ปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.34 mg/kg คิดเป็น 6.73 % (ลดลงจาก 1.41 mg/kg เหลือ 1.08 mg/kg) ส่วนที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 0.73 mg/kg คิดเป็น 2.44% (ลดลงจาก 11.78 mg/kg เหลือ 10.94 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน พบปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลง 1.02 mg/kg คิดเป็น 2.43% (ลดลงจาก 11.78 mg/kg เหลือ 11.05 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน พบปริมาณแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินลดลงลดลง 0.97 mg/kg ติดเป็น 2.24% (ลดลงจาก 12.21 mg/kg เหลือ 11.24 mg/kg) แสดงให้เห็นว่า การใส่ยิปซัมลงไปในดินมีผลทำให้ดินมีการดูดซับไอออนของแคดเมียมได้น้อยลง เมื่อยิปซัมละลายน้ำทำให้เกิดการแตกตัวของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ทำให้ไอออนของแคลเซียมถูกดูดซับไว้ในอนุภาคดินเหนียวได้มากขึ้น ดินจึงสามารถแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้ลดลง ในดินที่มีการใส่ยิปซัมจึงดูดซับแคดเมียมได้น้อยลง ทำให้มีปริมาณแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินมากกว่า ดินที่ไม่มีการผสมยิปซัม (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554, น.121)

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47



ภาพที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังใส่แคดเมียม

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542



ภาพที่ 2 (ต่อ)

◇, □, △ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเท่ากับ 5 mg/kg

◆, ■, ▲ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเท่ากับ 30 mg/kg

การเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

จากภาพที่ 3 (ก) และ 3 (ข) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินร่วนเหนียวตามช่วงเวลาพบว่า แคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีปริมาณความเข้มข้นลงลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 60 ของการบ่มดิน โดย ที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียมที่ 5 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) มีอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมากที่สุด โดยกระจายตัวในช่วง 2.37-3.38 mg/kg หลังจากบ่มดินนาน 60 วันปริมาณแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 0.51 mg/kg คิดเป็น 10.23% (ลดลงจาก 2.88 mg/kg เหลือ 2.37 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วันปริมาณแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 0.85 mg/kg คิดเป็น 17.07% (ลดลงจาก 2.57 mg/kg เหลือ 1.72 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วันปริมาณแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 0.90 mg/kg คิดเป็น 17.91% (ลดลงจาก

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

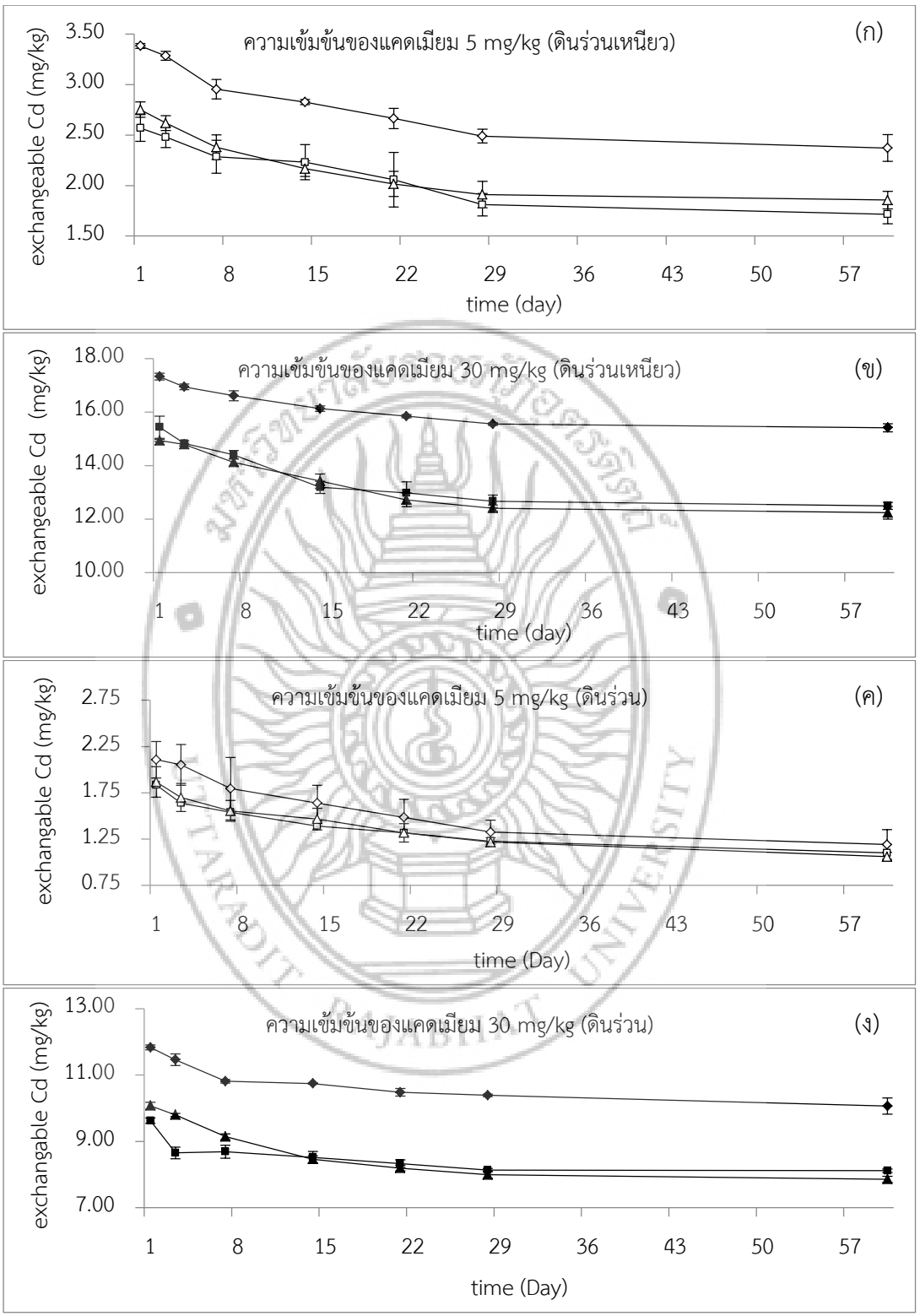
2.75 mg/kg เหลือ 1.86 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงเวลาที่บ่มดินเข้มข้นมากที่สุด และมีปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 0.91 mg/kg คิดเป็น 6.37% (ลดลงจาก 16.33 mg/kg เหลือ 15.42 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วันปริมาณแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 2.94 mg/kg คิดเป็น 9.80 % (ลดลงจาก 15.43 mg/kg เหลือ 12.49 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงระยะเวลาการบ่มดินอยู่ที่ 12.24 – 14.93 mg/kg หลังจากบ่มดินนาน 60 วันปริมาณแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 2.70 mg/kg คิดเป็น 8.99% (ลดลงจาก 14.93 mg/kg เหลือ 12.24 mg/kg)

นอกจากนั้นยังพบว่า การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินร่วนตามช่วงเวลา พบว่า แคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีปริมาณความเข้มข้นลงลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดินเช่นเดียวกับดินร่วนเหนียว และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่ม ที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) มีอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมากที่สุด หลังจากบ่มดินนาน 60 วันปริมาณแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 0.92 mg/kg คิดเป็น 18.40% (ลดลงจาก 2.11 mg/kg เหลือ 1.19 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วันปริมาณแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 0.74 mg/kg คิดเป็น 14.60% (ลดลงจาก 1.84 mg/kg เหลือ 1.10 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วันปริมาณแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 0.81 mg/kg คิดเป็น 16.20% (ลดลงจาก 1.87 mg/kg เหลือ 1.06 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงเวลาที่บ่มดินเข้มข้นมากที่สุด มีปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 1.77 mg/kg คิดเป็น 5.90% (ลดลงจาก 2.11 mg/kg เหลือ 1.19 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วันปริมาณแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง1.51 mg/kg 5.03 (ลดลงจาก 9.63 mg/kg เหลือ 8.12 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วันปริมาณแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 2.22 mg/kg คิดเป็น 7.40% (ลดลงจาก 10.08 mg/kg เหลือ 7.86 mg/kg) และจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่า ยิปซัมมีอิทธิพลทำให้แคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<.05$) ที่อัตราแคดเมียม 30 mg/kg และปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<.05$) เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมที่เติมลงในดินมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3 (ค) และ 3 (ง) และตารางที่ 6

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

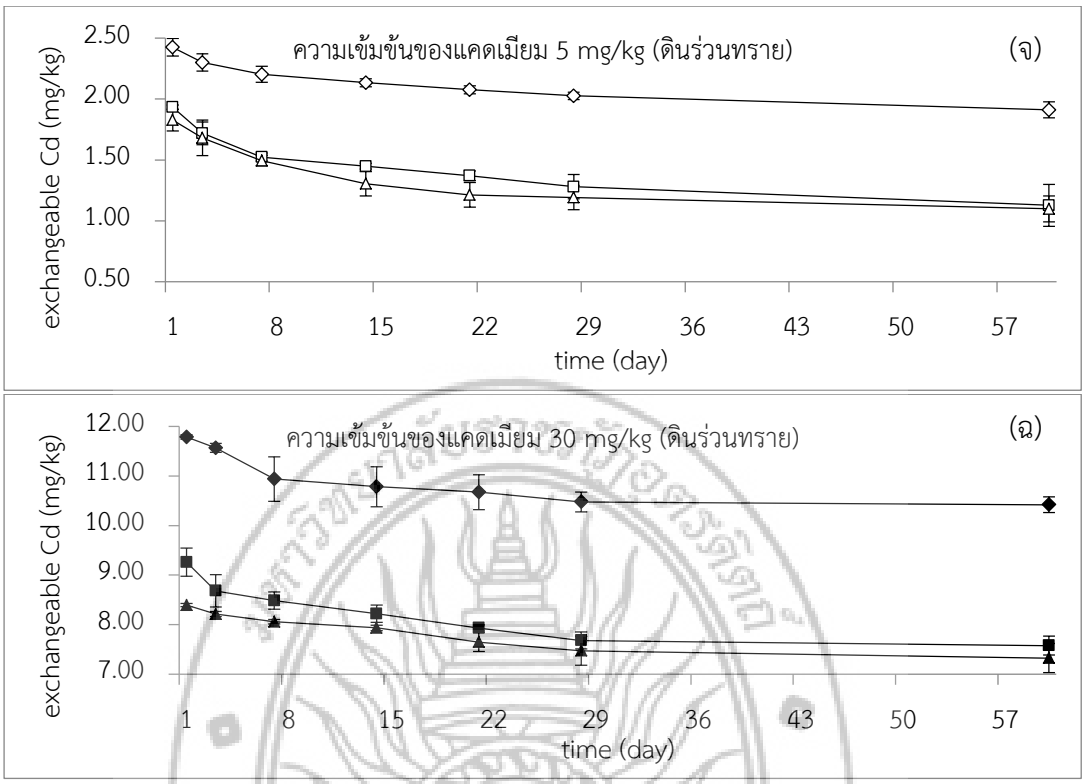
จากภาพที่ 3 (จ) และ 3 (ฉ) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินร่วนทรายตามช่วงเวลาพบว่า แคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีปริมาณความเข้มข้นลงลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่ม ที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) มีอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมากที่สุด มีปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 0.51 mg/kg คิดเป็น 10.27% (ลดลง 10.27% จาก 2.43 mg/kg เหลือ 1.91 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วันปริมาณแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 0.81 mg/kg คิดเป็น 16.12% (ลดลง 16.12% จาก 1.93 mg/kg เหลือ 1.13 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วันปริมาณแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 0.73 mg/kg คิดเป็น 14.60% (ลดลง 14.60% จาก 1.83 mg/kg เหลือ 1.10 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ตลอดช่วงเวลาที่บ่มดินเข้มข้นมากที่สุด มีปริมาณแคดเมียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 1.37 mg/kg คิดเป็น 4.56% (ลดลงจาก 11.79 เหลือ 10.42 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วันปริมาณแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 1.69 mg/kg คิดเป็น 5.62% (ลดลงจาก 7.58 เหลือ 9.26 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วันปริมาณแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง 1.07 mg/kg คิดเป็น 3.5% (ลดลงจาก 8.93 mg/kg เหลือ 7.32 mg/kg) ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงให้เห็นแนวโน้มได้ว่า อัตราการใส่ยิปซัมมีอิทธิพลต่อการลดลงของแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ซึงมีสัดส่วนการกระจายลดลงเมื่อใส่ยิปซัมในอัตราที่สูงขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากยิปซัมมีองค์ประกอบหลักที่เป็นแคลเซียม (Ca) และซัลเฟตในปริมาณสูง เมื่อละลายน้ำทำให้เกิดการแตกตัวของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554, น.121) ทำให้ไอออนของแคลเซียมถูกดูดซับไว้ในอนุภาคดินเหนียวได้มากขึ้น ดินจึงสามารถดูดซับไอออของแคดเมียมได้ลดลง

URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47



ภาพที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังใส่แคดเมียม

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542



ภาพที่ 3 (ต่อ)

◇, □, △ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเท่ากับ 5 mg/kg

◆, ■, ▲ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเท่ากับ 30 mg/kg

การเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมรูปคาร์บอเนตในดิน

จากภาพที่ 4 (ก) และ 4 (ข) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปคาร์บอเนตในดินร่วนเหนียวตามช่วงเวลาพบว่า แคดเมียมในรูปที่คาร์บอเนตมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน จากนั้นอัตราการเพิ่มของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตในดินมีอัตราลดลง แต่ปริมาณความเข้มข้นยังเพิ่มอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่ม ที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) มีอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 1.16-1.45 mg/kg หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.29 mg/kg คิดเป็น 3.70% (เพิ่มจาก 1.16 mg/kg เป็น 1.45 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินมีปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.23 mg.kg คิดเป็น 4.55% (เพิ่มจาก 1.19 mg/kg เป็น 1.42 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัม

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

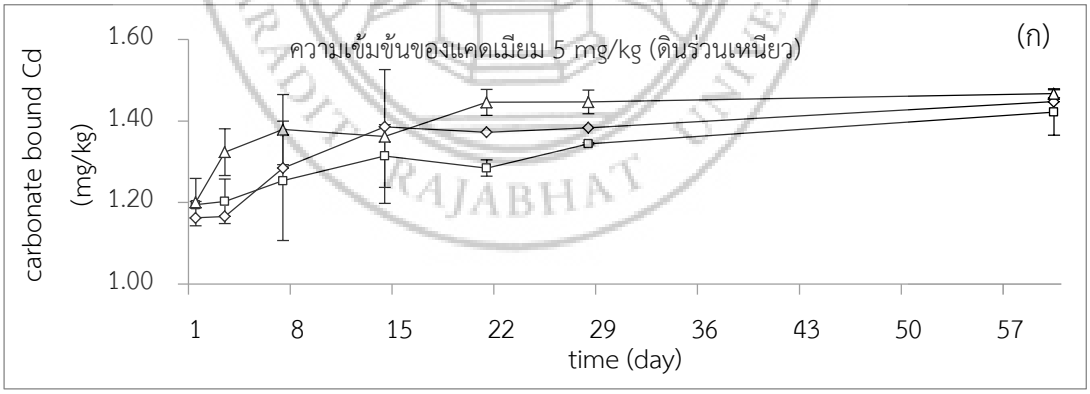
ในอัตรา 8% ของน้ำหนักดินมี หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.27 mg/kg คิดเป็น 5.23% (เพิ่มจาก 1.20 mg/kg เป็น 1.47 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.41 mg/kg คิดเป็น 1.38% (เพิ่มจาก 3.90 mg/kg เป็น 4.32 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน มีปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 1.06 mg/kg คิดเป็น 5.33% (เพิ่มจาก 3.74 mg/kg เป็น 5.34 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 1.25 mg/kg คิดเป็น 4.17% (เพิ่มจาก 4.55 mg/kg เป็น 5.80 mg/kg)

จากภาพที่ 4 (ค) และ 4 (ง) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปคาร์บอเนตในดินร่วนตามช่วงเวลาพบว่าในทุกชุดดินแคดเมียมในรูปที่คาร์บอเนตในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน จากนั้นอัตราการเพิ่มของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตในดินมีอัตราลดลง แต่ปริมาณความเข้มข้นยังเพิ่มอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่ม ที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้น 0.36 mg/kg คิดเป็น 5.20% (เพิ่มจาก 1.01 mg/kg เป็น 1.37 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินมีปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.32 mg/kg คิดเป็น 6.60% (เพิ่มจาก 1.01 mg/kg เป็น 1.46 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.40 mg/kg คิดเป็น 8.00% (เพิ่มจาก 1.04 mg/kg เป็น 1.44 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) มีอัตราการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตหลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.47 mg/kg คิดเป็น 1.57% (เพิ่มจาก 2.40 mg/kg เป็น 2.87 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน มีปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 1.09 mg/kg คิดเป็น 3.63% (เพิ่มจาก 2.55 mg/kg เป็น 3.46 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน มีปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 1.41 mg/kg คิดเป็น 4.70% (เพิ่มจาก 2.68 mg/kg เป็น 4.09 mg/kg) จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg อัตรายิปซัมมีผลต่อแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<.05$) และปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<.05$) ตามปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่เติมลงในดิน ดังแสดงในตารางที่ 6 และมีแนวโน้มว่าปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มดินนานขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4

จากภาพที่ 4 (จ) และ 4 (ฉ) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปคาร์บอเนตในดินร่วนทรายตามช่วงเวลาพบว่าแคดเมียมในรูปที่คาร์บอเนตในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง

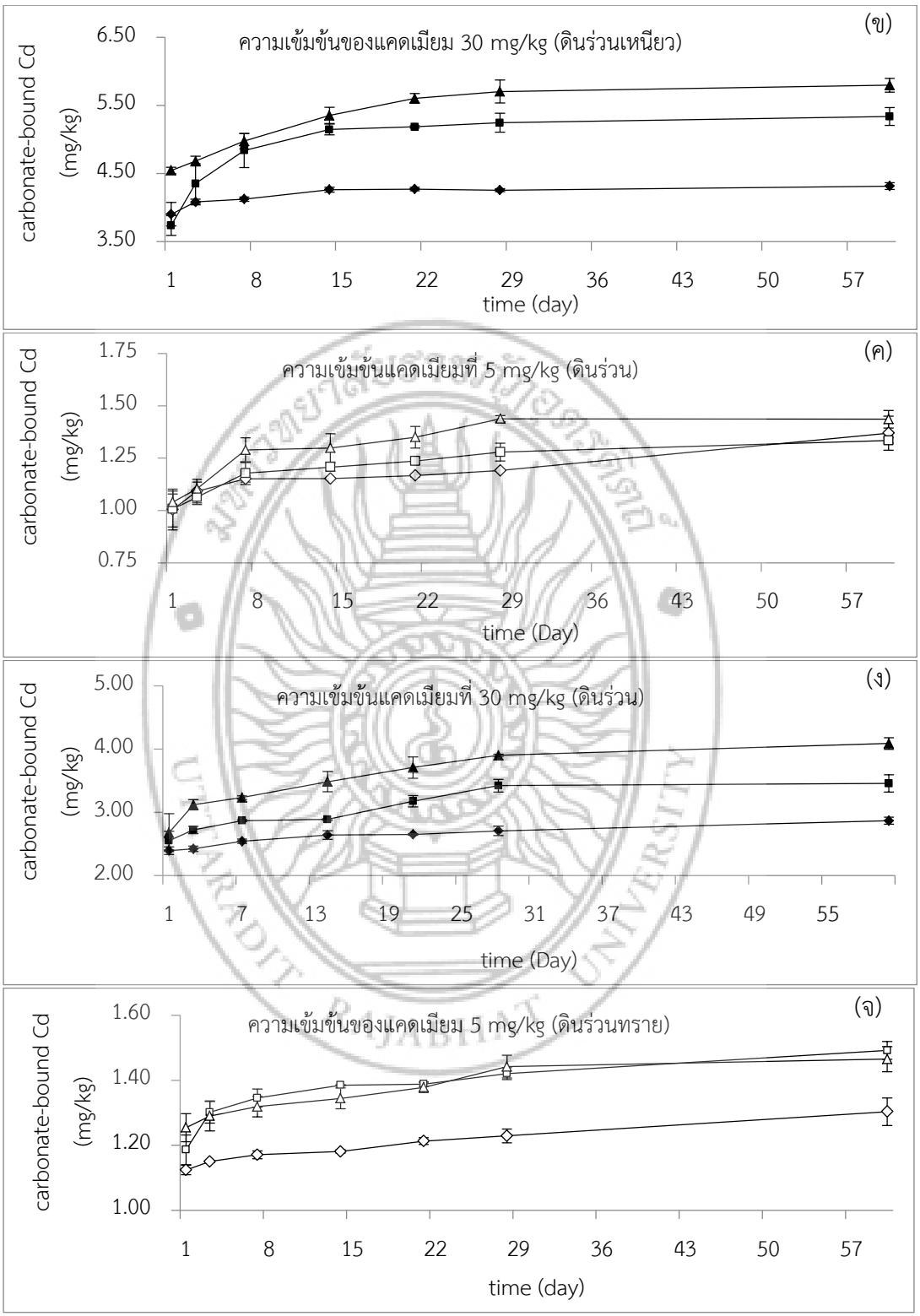
3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

7 วันแรกของการบ่มดิน จากนั้นอัตราการเพิ่มของแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตในดินมีอัตราลดลง แต่ปริมาณความเข้มข้นยังเพิ่มอย่างต่อเนื่อง ซึ่งที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.18 mg/kg คิดเป็น 3.59% (เพิ่มจาก 1.12 mg/kg เป็น 1.30 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินมีปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.31 mg/kg คิดเป็น 6.11% (เพิ่มจาก 1.19 mg/kg เป็น 1.49 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.21 mg/kg คิดเป็น 4.22% (เพิ่มจาก 1.25 mg/kg เป็น 1.47 mg/kg) ส่วนที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.37 mg/kg คิดเป็น 1.23% (เพิ่มจาก 2.45 mg/kg เป็น 2.82 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 1.05 mg/kg คิดเป็น 3.49% (เพิ่มจาก 3.27 mg/kg เป็น 4.32 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน ลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ปริมาณแคดเมียมรูปคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น 0.73 mg/kg คิดเป็น 2.45% (เพิ่มจาก 3.29 mg/kg เป็น 4.03 mg/kg) จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในระดับเดียวกัน การใส่ยิปซัมมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมรูปคาร์บอเนตให้เพิ่มขึ้น แต่อัตราการใส่ยิปซัมที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปคาร์บอเนต



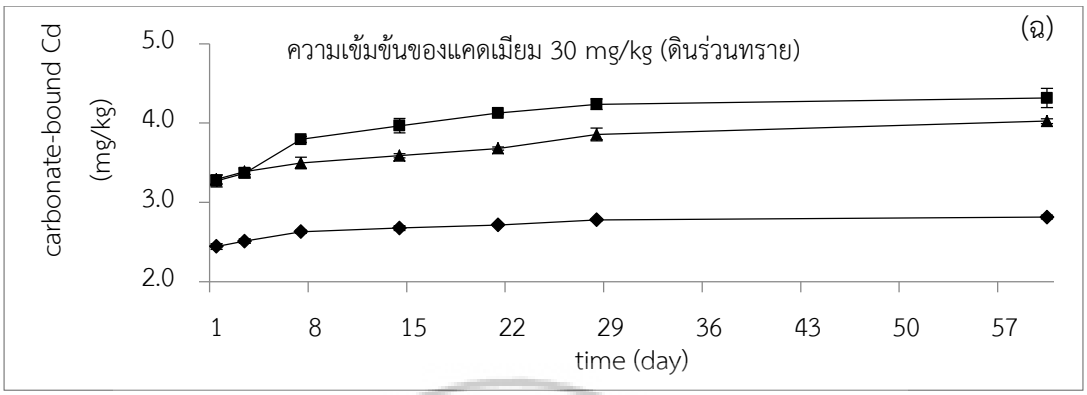
ภาพที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปคาร์บอเนต ในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังใส่แคดเมียม

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47



ภาพที่ 4 (ต่อ)

323307754 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47



ภาพที่ 4 (ต่อ)

◇, □, △ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเท่ากับ 5 mg/kg

◆, ■, ▲ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเท่ากับ 30 mg/kg

การเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดิน

จากภาพที่ 5 (ก) และ 5 (ข) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดินร่วนเหนียวตามช่วงเวลาพบว่า แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน และปริมาณความเข้มข้นยังเพิ่มอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่ม ซึ่งที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) มีอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเมื่อบ่มดินนาน 60 วันทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.34 mg/kg คิดเป็น 6.73% (เพิ่มขึ้นจาก 0.63 mg/kg เป็น 0.97 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินมีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.20 mg/kg คิดเป็น 6.94% (เพิ่มจาก 0.53 mg/kg เป็น 0.73 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดินเมื่อบ่มดินนาน 60 วันทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.38 mg/kg คิดเป็น 7.56% (เพิ่มจาก 0.35 mg/kg เป็น 0.73 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) เมื่อบ่มดินนาน 60 วันทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.85 mg/kg คิดเป็น 2.83% (เพิ่มขึ้นจาก 3.31 mg/kg เป็น 4.16 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน มีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.99 mg/kg คิดเป็น 3.29% (เพิ่มจาก 3.55 mg/kg เป็น 4.53 mg/kg)

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

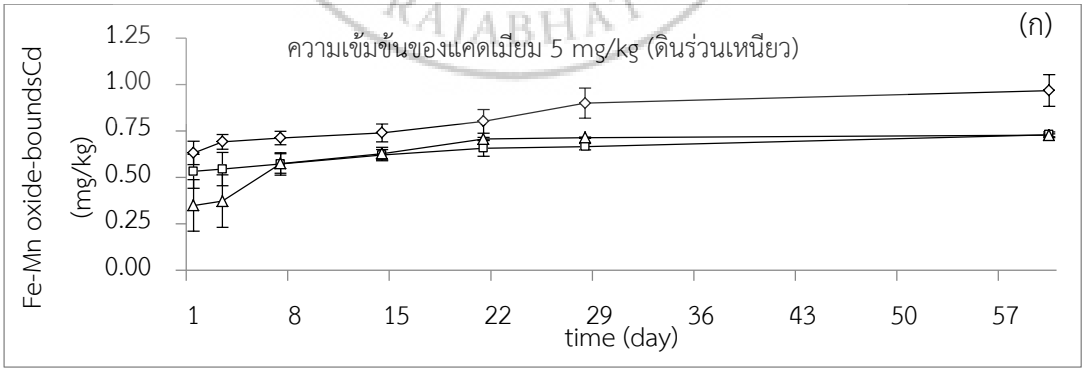
ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดินเมื่อบ่มดินนาน 60 วันทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.66 mg/kg คิดเป็น 3.21% (เพิ่มจาก 2.61 mg/kg เป็น 2.97 mg/kg)

จากภาพที่ 5 (ค) และ 5 (ง) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดินร่วนตามช่วงเวลาพบว่า แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสมีการเพิ่มปริมาณอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน ที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) มีอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 0.45-0.73 mg/kg เมื่อบ่มดินนาน 60 วันทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.28 mg/kg คิดเป็น 5.40% (เพิ่มขึ้นจาก 1.01 mg/kg เป็น 1.37 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินมีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.27 mg/kg คิดเป็น 5.80% (เพิ่มจาก 0.54 mg/kg เป็น 0.81 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน เมื่อบ่มดินนาน 60 วันทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.35 mg/kg คิดเป็น 7.00% (เพิ่มจาก 0.45 mg/kg เป็น 0.80 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วันทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.79 mg/kg คิดเป็น 2.63% (เพิ่มขึ้นจาก 2.07 mg/kg เป็น 2.86 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน มีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 1.04 mg/kg คิดเป็น 3.47% (เพิ่มจาก 2.29 mg/kg เป็น 3.33 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน เมื่อบ่มดินนาน 60 วันทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.88 mg/kg คิดเป็น 2.93% (เพิ่มจาก 2.16 mg/kg เป็น 3.04 mg/kg) จาการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่า ยิปซัมไม่มีผลต่อแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดิน อย่างไรก็ตามปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<.05$) ตามปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่เติมลงในดิน ดังตารางที่ 6

จากภาพที่ 5 (จ) และ 5 (ฉ) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดินร่วนทรายตามช่วงเวลาพบว่า แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน และปริมาณความเข้มข้นยังเพิ่มอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่มดิน ซึ่งที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) เมื่อบ่มดินนาน 60 วันทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.37 mg/kg

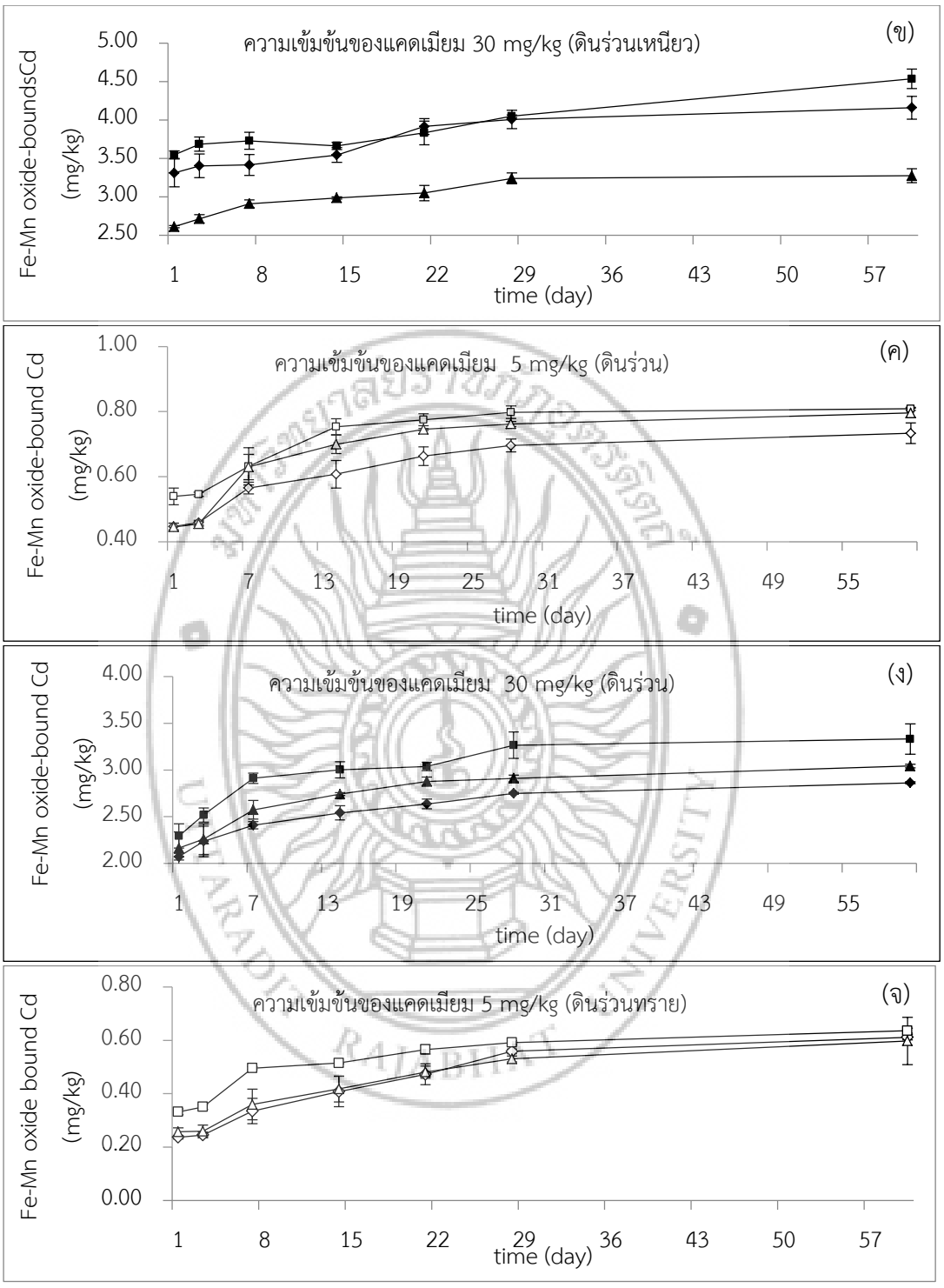
323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

คิดเป็น 5.49% (เพิ่มขึ้นจาก 0.24 mg/kg เป็น 0.61 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินมีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.30 mg/kg คิดเป็น 6.08% (เพิ่มจาก 0.33 mg/kg เป็น 0.64 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดินเมื่อบ่มดินนาน 60 วันทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.34 mg/kg คิดเป็น 6.80% (เพิ่มจาก 0.26 mg/kg เป็น 0.60 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) เมื่อบ่มดินนาน 60 วันทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.79 mg/kg คิดเป็น 2.64% (เพิ่มขึ้นจาก 1.23 mg/kg เป็น 2.02 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน มีปริมาณแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 0.80 mg/kg คิดเป็น 2.67% (เพิ่มจาก 1.69 mg/kg เป็น 2.49 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน เมื่อบ่มดินนาน 60 วันทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น 1.02 mg/kg คิดเป็น 3.24% (เพิ่มจาก 1.52 mg/kg เป็น 2.54 mg/kg) จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใส่ยิปซัมมีผลให้ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn) เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากยิปซัมมีองค์ประกอบของ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554, น.8; Yubo Yan Xiaoli Dong, 2014, p.70; Chindaprasirt et al., (2011, p.3199) ที่ทำปฏิกิริยากับไอออนของแคดเมียม(Cd^{2+}) ได้ ทำให้ในดินที่มีการใส่ยิปซัมมีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสมากกว่าชุดดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของยิปซัมต่อแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส แต่หากพิจารณาถึงอัตราการเพิ่มข้นของแคดเมียมรูปออกไซของเหล็กและแมงกานีสในดิน ทั้งที่มีการใสและไม่ใส่ยิปซัม พบว่า มีสัดส่วนการเพิ่มขึ้นไม่ต่างกันมากตามระยะเวลาที่บ่มดิน



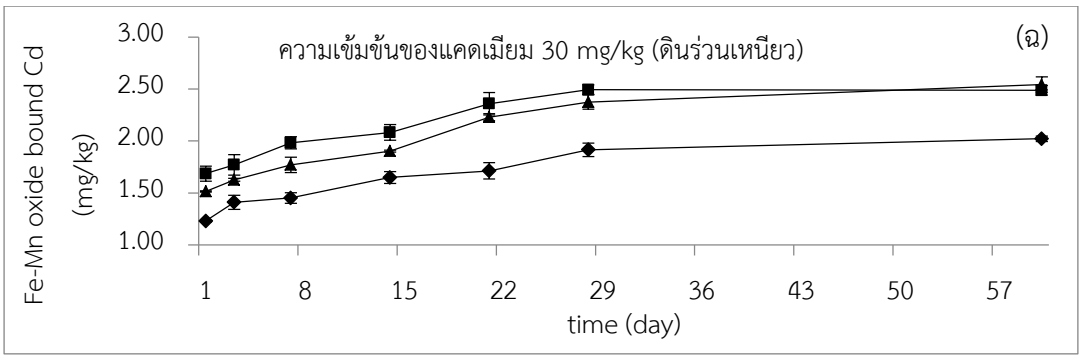
ภาพที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังเติมแคดเมียม

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47



ภาพที่ 5 (ต่อ)

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47



ภาพที่ 5 (ต่อ)

◇, □, △ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเท่ากับ 5 mg/kg

◆, ■, ▲ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเท่ากับ 30 mg/kg

การเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมรูปออร์แกนิก

จากภาพที่ 6 (ก) และ 6 (ข) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปออร์แกนิกในดินร่วนเหนียวตามช่วงเวลาพบว่า แคดเมียมรูปที่ออร์แกนิกในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 7 วันแรกของการบ่มดิน และปริมาณความเข้มข้นยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 60 ของการบ่ม ซึ่งที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.35 mg/kg คิดเป็น 7.08% (เพิ่มขึ้นจาก 0.23 mg/kg เป็น 0.58 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.44 mg/kg คิดเป็น 8.73% (เพิ่มจาก 0.23 mg/kg เป็น 0.66 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.23 mg/kg คิดเป็น 4.66% (เพิ่มจาก 0.24 mg/kg เป็น 0.47 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) มีอัตราความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกตลอดช่วงระยะเวลาบ่มดินอยู่ที่ 0.22-0.73 mg/kg หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.51 mg/kg คิดเป็น 1.70% (เพิ่มขึ้นจาก 0.22 mg/kg เป็น 0.73 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.53 mg/kg คิดเป็น 1.75% (เพิ่มจาก 0.28 mg/kg เป็น 0.80 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ทำให้ดินมี

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

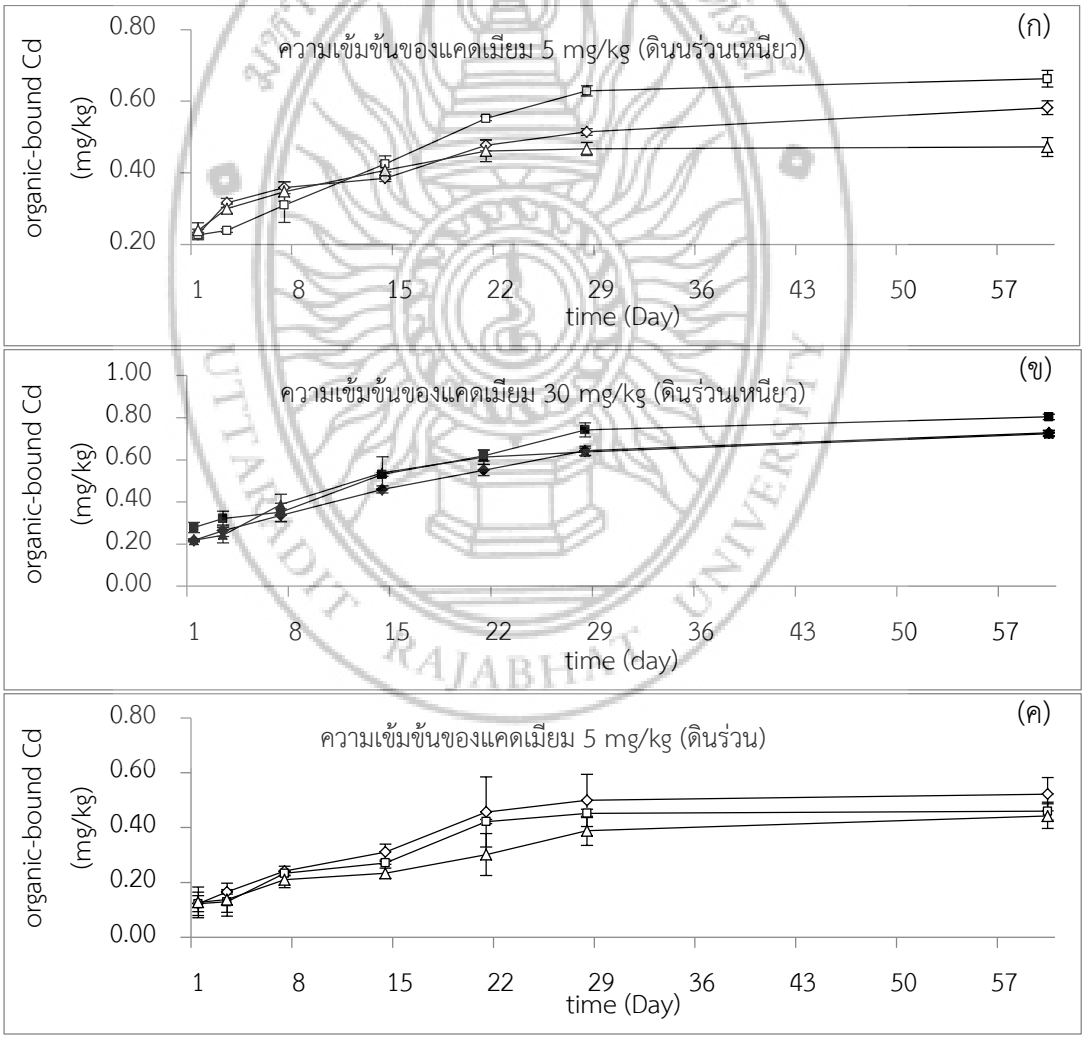
ปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.51 mg/kg คิดเป็น 1.69% (เพิ่มจาก 0.22 mg/kg เป็น 0.72 mg/kg)

จากภาพที่ 6 (ค) และ 6 (ง) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปออร์แกนิกในดินร่วนตามช่วงเวลา พบว่า แคดเมียมรูปที่ออร์แกนิกในดินมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 7 วัน แรกของการบ่มดิน ซึ่งที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.40 mg/kg คิดเป็น 8.00% (เพิ่มขึ้นจาก 0.12 mg/kg เป็น 0.52 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.34 mg/kg คิดเป็น 6.80% (เพิ่มจาก 0.12 mg/kg เป็น 0.46 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.31 mg/kg คิดเป็น 6.20% (เพิ่มจาก 0.13 mg/kg เป็น 0.44 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ทำให้ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.54 mg/kg คิดเป็น 1.80% (เพิ่มขึ้นจาก 0.21 mg/kg เป็น 0.75 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.50 mg/kg คิดเป็น 1.67% (เพิ่มจาก 0.18 mg/kg เป็น 0.68 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.45 mg/kg คิดเป็น 2.10% (เพิ่มจาก 2.16 mg/kg เป็น 3.04 mg/kg) และจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่าอัตราการใส่ยิปซัมส่งผลผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมในออร์แกนิกในดินให้เพิ่มขึ้นมากกว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม ดังแสดงในตารางที่ 6

จากภาพที่ 6 (จ) และ 6 (ฉ) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปออร์แกนิกในดินร่วนทรายตามช่วงเวลาที่บ่มดิน พบว่า แคดเมียมรูปที่ออร์แกนิกมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 14 วันแรกของการบ่มดิน จากนั้นอัตราการเพิ่มของแคดเมียมรูปออร์แกนิกในดินลดลง แต่ปริมาณความเข้มข้นยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่ม ซึ่งที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.17 mg/kg คิดเป็น 3.33% (เพิ่มขึ้นจาก 0.12 mg/kg เป็น 0.29 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.45 mg/kg คิดเป็น 6.11% (เพิ่มจาก 0.14 mg/kg เป็น 0.59 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.35 mg/kg คิดเป็น 5.93% (เพิ่มจาก 0.16 mg/kg เป็น 0.51 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.47 mg/kg คิดเป็น

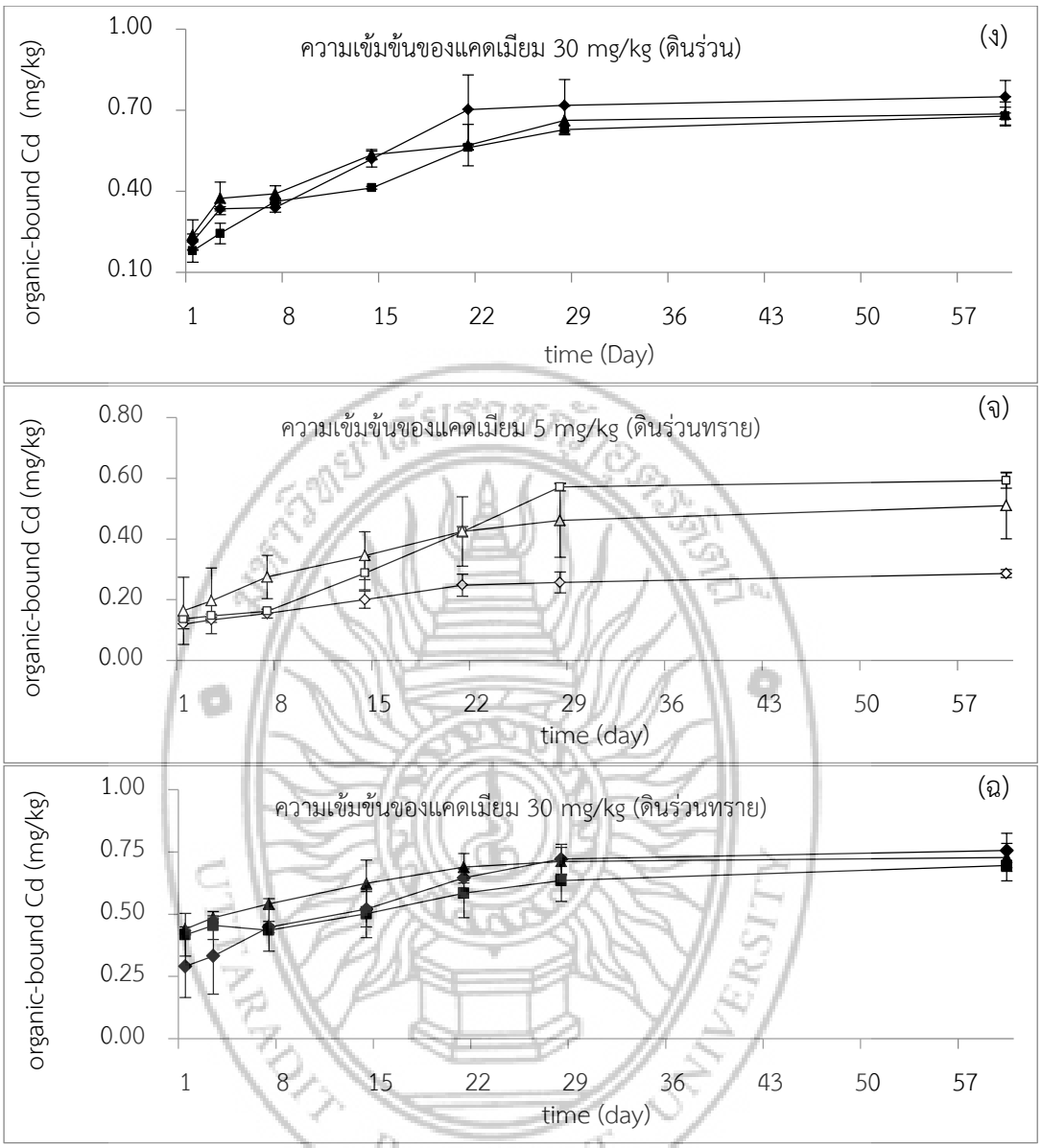
323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

1.55% (เพิ่มขึ้นจาก 0.29 mg/kg เป็น 0.76 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.28 mg/kg คิดเป็น 0.93% (เพิ่มจาก 0.42 mg/kg เป็น 0.70 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปออร์แกนิกเพิ่มขึ้น 0.29 mg/kg คิดเป็น 0.96% (เพิ่มจาก 0.44 mg/kg เป็น 0.73 mg/kg) และจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่า การใส่ยิปซัมในอัตราที่ต่างกันไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมในออร์แกนิกในดินให้ต่างกัน (แสดงในตารางที่ 7-9) อย่างไรก็ตาม การใส่ยิปซัมลงในดินสามารถช่วยเพิ่มการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปออร์แกนิกได้ดีกว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม ทั้งนี้เนื่องมาจากยิปซัมเป็นสารอนินทรีย์ (ยุทธ์ดนัย ยอดทองดี, 2555, น.8)



ภาพที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปออร์แกนิก ในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังใส่แคดเมียม

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542



ภาพที่ 6 (ต่อ)

◇, □, △ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg

◆, ■, ▲ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

การเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด

จากภาพที่ 7 (ก) และ 7 (ข) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดในดินร่วนเหนียวตามช่วงเวลาพบว่า แคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 60 วันหลังการบ่มดินและมีแนวโน้มจะเพิ่มอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้นจนถึงประมาณ 30 วันปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดจะเริ่มมีปริมาณคงที่ ซึ่งที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.15 mg/kg คิดเป็น 2.93% (เพิ่มขึ้นจาก 0.21 mg/kg เป็น 0.36 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินมีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.19 mg/kg คิดเป็น 3.89% (เพิ่มจาก 0.41 mg/kg เป็น 0.60 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.15 mg/kg คิดเป็น 3.02% (เพิ่มจาก 0.33 mg/kg เป็น 0.48 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.37 mg/kg คิดเป็น 1.23% (เพิ่มขึ้นจาก 1.19 mg/kg เป็น 1.55 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน มีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.65 mg/kg คิดเป็น 2.15% (เพิ่มจาก 2.63 mg/kg เป็น 2.28 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.43 mg/kg คิดเป็น 1.43% (เพิ่มจาก 2.83 mg/kg เป็น 3.26 mg/kg) จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่าอัตราการใส่ยิปซัมมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<.05$) และปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<.05$) ตามปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่เติมลงในดิน ดังที่แสดงในตารางที่ 6

จากภาพที่ 7 (ค) และ 7 (ง) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดในดินร่วนตามช่วงเวลาพบว่าในทุกชุดดินแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 30 วันหลังการบ่มดินปริมาณแคดเมียมจะเริ่มคงที่ แค่ยังเพิ่มอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.12 mg/kg คิดเป็น 2.20% (เพิ่มขึ้นจาก 0.46 mg/kg เป็น 0.58 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินมีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.12 mg/kg คิดเป็น 2.40% (เพิ่มจาก 0.62 mg/kg เป็น 0.74 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปที่เหลือจาการสกัดเพิ่มขึ้น 0.12 mg/kg คิดเป็น 2.40% (เพิ่มจาก 0.80 mg/kg เป็น 0.92 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30

323307754 URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

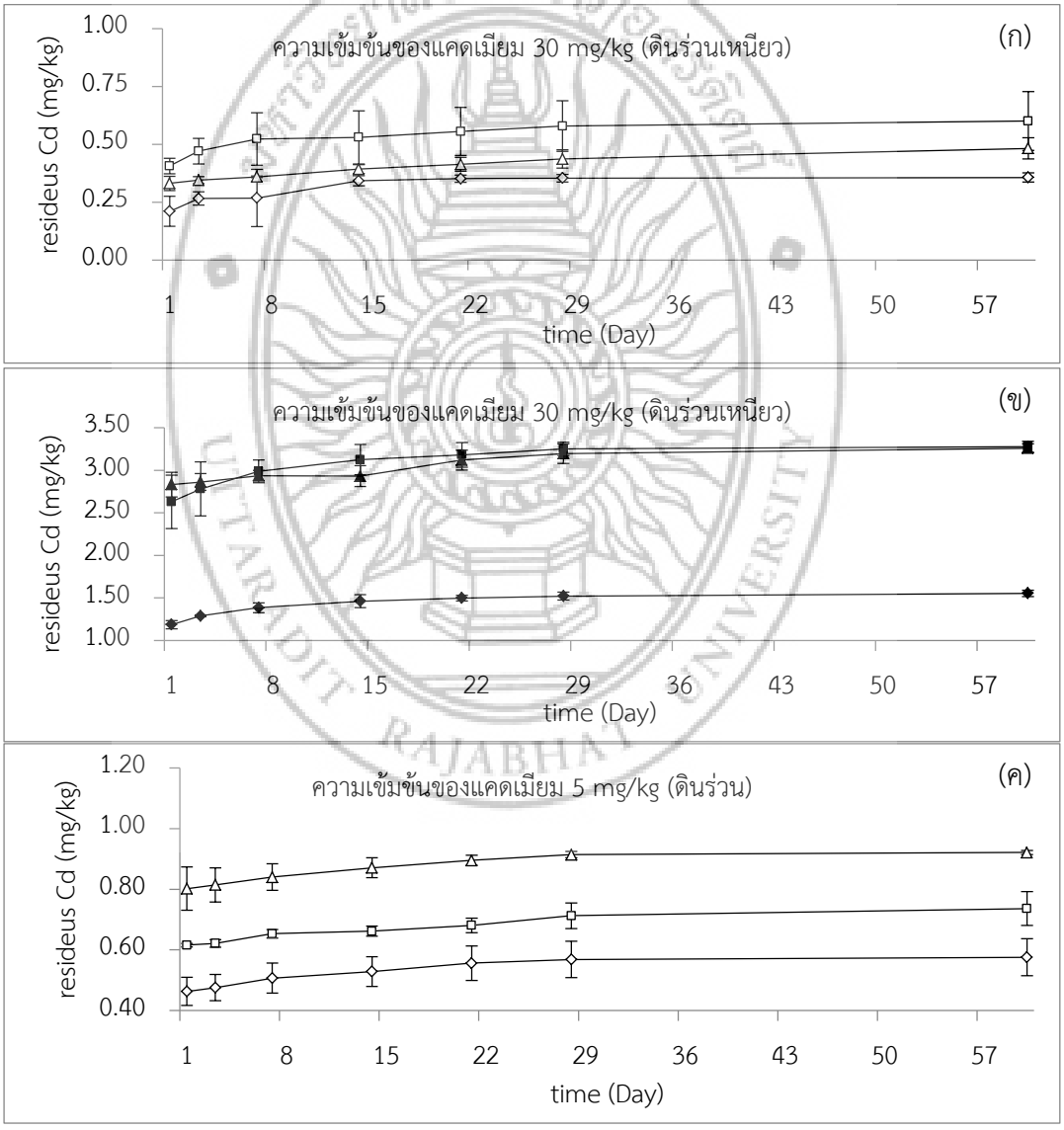
mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.18 mg/kg คิดเป็น 0.57% (เพิ่มขึ้นจาก 0.64 mg/kg เป็น 0.82 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน มีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.21 mg/kg คิดเป็น 1.03% (เพิ่มจาก 3.91 mg/kg เป็น 4.22 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.13 mg/kg คิดเป็น 1.43% (เพิ่มจาก 3.07 mg/kg เป็น 4.10 mg/kg) ซึ่งจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่าอัตราการใส่ยิปซัมมีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<.05$) และปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ($p<.05$) เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมที่เติมลงในดินเพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในตารางที่ 6

จากภาพที่ 7 (จ) และ 7 (ฉ) การเปลี่ยนของแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดในดินร่วนทรายตามช่วงเวลาพบว่าในทุกชุดดินแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 30 วันหลังการบ่มดิน จากนั้นจะเริ่มมีปริมาณคงที่ แต่ยังมีแนวโน้มจะเพิ่มอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.06 mg/kg คิดเป็น 1.29% (เพิ่มขึ้นจาก 0.25 mg/kg เป็น 0.31 mg/kg) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินมีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.08 mg/kg คิดเป็น 1.69% (เพิ่มจาก 0.19 mg/kg เป็น 0.27 mg/kg) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.11 mg/kg คิดเป็น 2.23% (เพิ่มจาก 0.36 mg/kg เป็น 0.47 mg/kg) และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) ดินมีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัด หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินเพิ่มขึ้น 0.24 mg/kg คิดเป็น 0.81% (เพิ่มขึ้นจาก 3.19 mg/kg เป็น 3.42 mg/kg) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินมีปริมาณแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.30 mg/kg คิดเป็น 1.02% (เพิ่มจาก 3.97 mg/kg เป็น 4.27 mg/kg) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน ดินมีปริมาณแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดเพิ่มขึ้น 0.13 mg/kg คิดเป็น 1.44% (เพิ่มจาก 4.22 mg/kg เป็น 4.36 mg/kg)

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแสดงให้เห็นว่าอัตราการใส่ยิปซัมมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<.05$) ในทุกชุดดิน และปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปที่เหลือจากการสกัดมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<.05$) เมื่อปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่เติมลงในดินเพิ่มขึ้น (แสดงในตารางที่ 7-9) จากข้อมูลข้างต้น

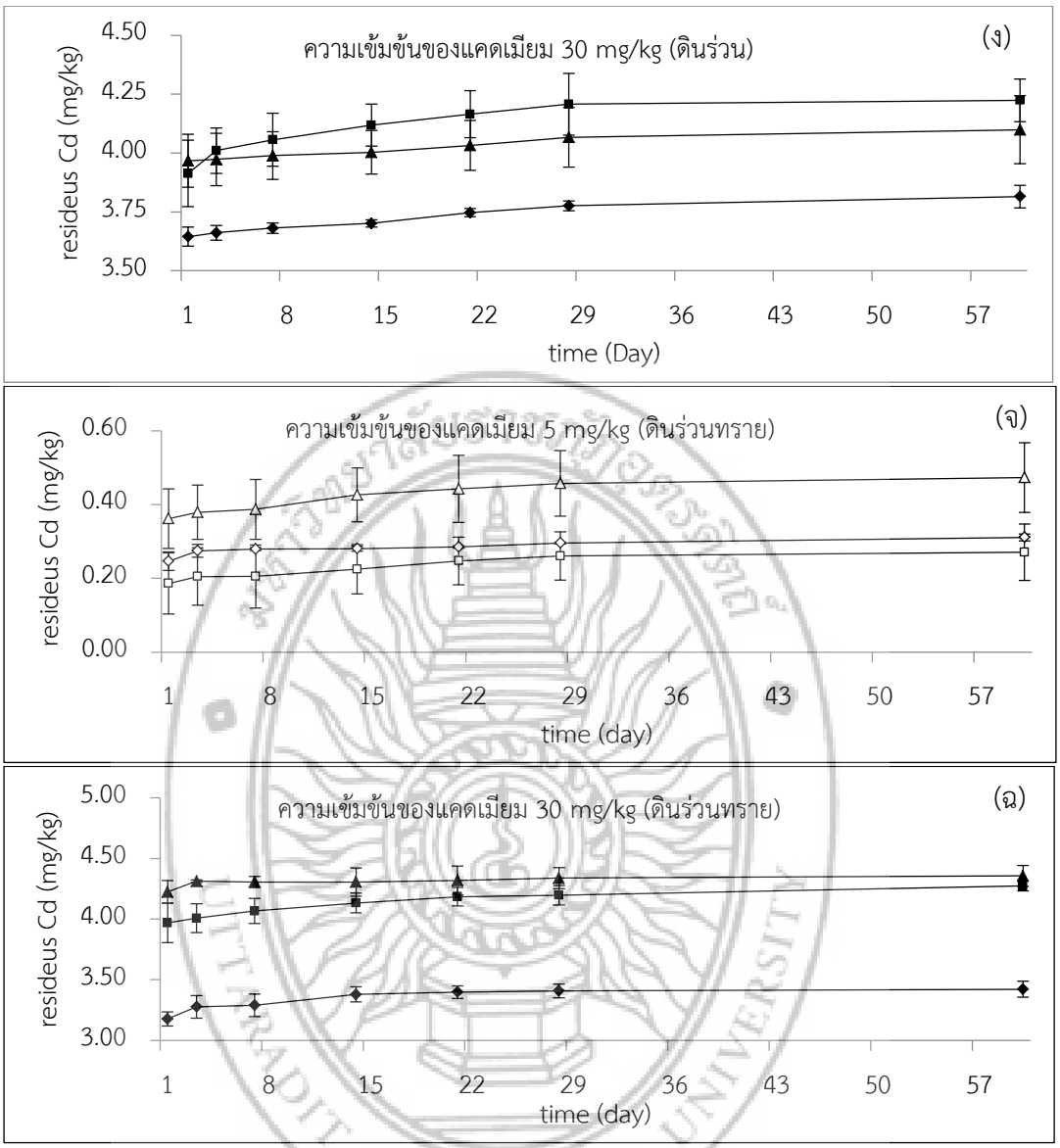
3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

แสดงให้เห็นได้ว่า การใส่ยิปซัมในอัตราที่กำหนดมีผลทำให้แคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด ซึ่งเป็นรูปที่มีความเสถียรและเคลื่อนที่ได้ยาก มีปริมาณเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับอัตราการใส่ยิปซัมในดิน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะยิปซัมมีองค์ประกอบของธาตุบางชนิด เช่น ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนและปฏิกริยาออกซิเดชั่นได้ทำให้แคดเมียมไอออน(Cd^{2+}) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ และเคลื่อนย้ายในสารละลายดินได้ยาก (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554, น.8; Yubo Yan Xiaoli Dong, 2014, p.70; Chindaprasirt et al., 2011, p.3199)



ภาพที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัดในช่วงเวลา 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วันหลังใส่แคดเมียม

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47



ภาพที่ 7 (ต่อ)

◇, □, △ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเท่ากับ 5 mg/kg

◆, ■, ▲ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 %SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเท่ากับ 30 mg/kg

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

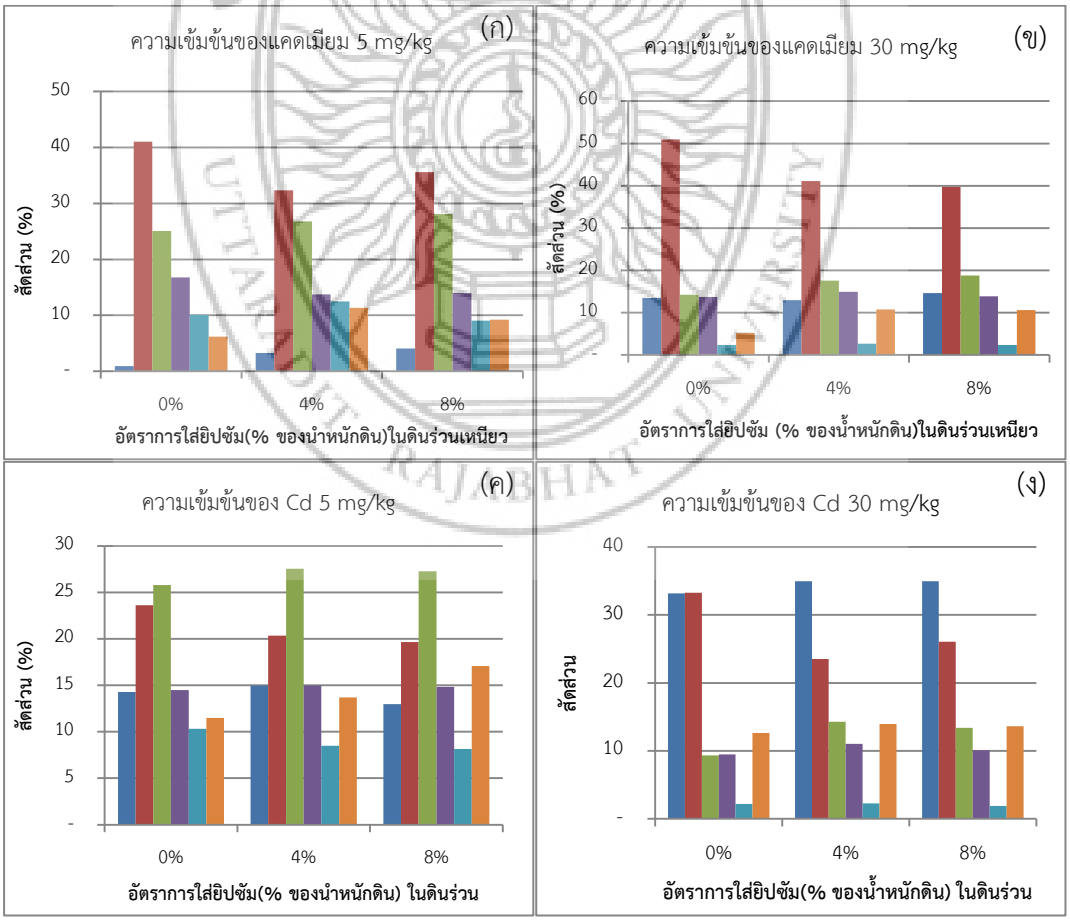
อิทธิพลของยิปซัมต่อการแพร่กระจายของรูปทางเคมีของแคดเมียมในดินทั้ง 3 ชนิด หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน

จากการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในรูปทางเคมีต่าง ๆ ด้วยวิธีสกัดลำดับขั้นหลังบ่มดินนาน 60 วัน พบว่า การใส่ยิปซัมมีผลทำให้ดินดูดซับแคดเมียมในรูปทางเคมีที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพได้ลดลง ในขณะที่รูปทางเคมีของแคดเมียมในกลุ่มที่อยู่ในสภาพไม่พร้อมใช้ทางชีวภาพ (แคดเมียมในรูปคาร์บอเนต,รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส,รูปออร์แกนิกและรูปที่เหลือจากการสกัด) มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ($p<0.05$) เมื่อเทียบกับชุดดินที่ไม่มีการใส่ยิบซัม แสดงดังภาพที่ 9 โดยเมื่อพิจารณาถึงแคดเมียมในรูปทางเคมีที่มีสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ พบว่า ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg ในชุดดินที่เป็นดินร่วนเหนียวที่มีการใส่ยิบซัมในอัตรา 0, 4 และ 8% ของน้ำหนักดิน มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพ เท่ากับ 41.09, 32.52 และ 35.79% ของปริมาณการปนเปื้อน ส่วนในชุดดินที่เป็นดินร่วนที่มีการใส่ยิปซัม ในอัตรา 0, 4 และ 8% ของน้ำหนักดิน มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพในดิน เท่ากับ 24.33, 21.14 และ 20.31% และในชุดดินที่เป็นดินร่วนทรายที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 0, 4 และ 8% ของน้ำหนักดิน มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมี ที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพในดิน เท่ากับ 35.89, 22.67 และ 22.11% ตามลำดับ และที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่า ในชุดดินที่เป็นดินร่วนเหนียวที่มีการใส่ยิบซัมในอัตรา 0, 4 และ 8% ของน้ำหนักดิน มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพ เท่ากับ 55.04, 45.06 และ 44.24% ส่วนในชุดดินที่เป็นดินร่วนที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 0, 4 และ 8% ของนำหนักดิน มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพในดิน เท่ากับ 43.30, 34.12 และ 36.62% และในชุดดินที่เป็นดินร่วนทรายที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 0, 4 และ 8% ของน้ำหนักดิน มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพในดิน เท่ากับ 45.25, 35.97 และ 35.48% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ในทุกชุดดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม จะมีสัดส่วนการกระจายของแคดเมียมในรูปที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพมากกว่าชุดดินที่มีการใส่ยิปซัม แสดงให้เห็นได้ว่า การใส่ยิปซัมสามารถลดการกระจายของแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพลงได้ หรือกล่าวได้ว่ายิปซัมสามารถลดความเป็นพิษของแคดเมียมในดินได้

ในขณะเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่อยู่ในสภาพไม่พร้อมใช้ทางชีวภาพ พบว่า ที่ความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg ในชุดดินที่เป็นดินร่วนเหนียวที่มีการใส่ยิบซัมในอัตรา 0, 4 และ 8% ของน้ำหนักดิน มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่ไม่พร้อมใช้ทางชีวภาพ เท่ากับ 58.91, 67.48 และ 64.21% ของปริมาณการปนเปื้อน

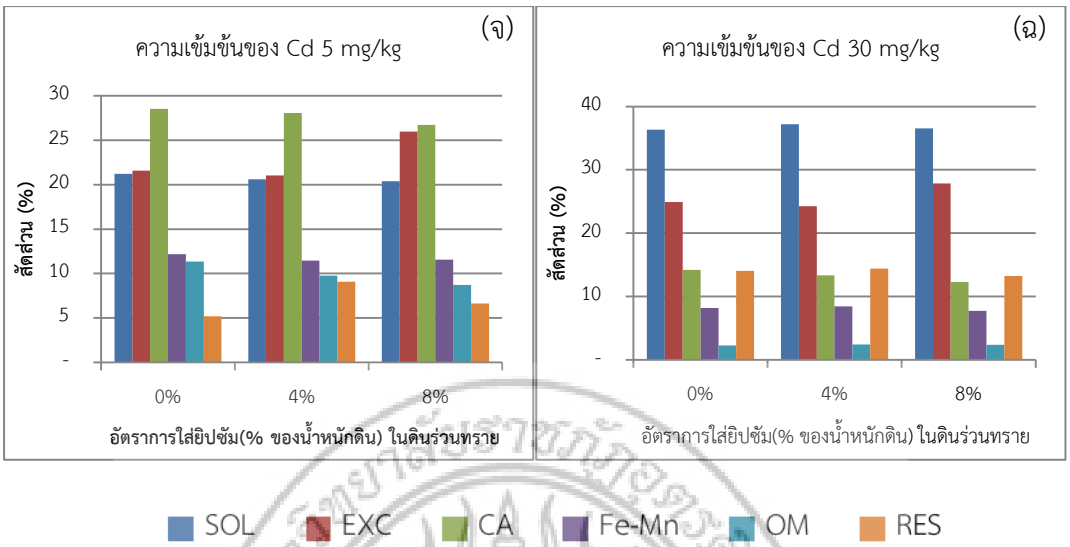
3233077542 URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ทั้งหมด ส่วนในชุดดินที่เป็นดินร่วนที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 0, 4 และ 8% ของน้ำหนักดิน มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพในดิน เท่ากับ 75.67, 78.86 และ 79.63% และในชุดดินที่เป็นดินร่วนทรายที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 0, 4 และ 8% ของน้ำหนักดิน มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพในดิน เท่ากับ 64.11, 77.33 และ 77.89% ตามลำดับ และที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 30 mg/kg พบว่า ในชุดดินที่เป็นดินร่วนเหนียวที่มีการใส่ยิบซัมในอัตรา 0, 4 และ 8% ของน้ำหนักดิน มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพเท่ากับ 44.96, 54.94 และ 55.67% ของปริมาณการปนเปื้อนแคดเมียมทั้งหมดส่วนในชุดดินที่เป็นดินร่วนที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 0, 4 และ 8% ของนำหนักดิน มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่ไม่พร้อมใช้ทางชีวภาพในดิน เท่ากับ 56.70, 65.88 และ 63.38% และในชุดดินที่เป็นดินร่วนทรายที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 0, 4 และ 8% ของน้ำหนักดิน มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่อยู่ในสภาพพร้อมไม่ใช้ทางชีวภาพในดิน เท่ากับ 54.75, 64.03 และ 64.52% ตามลำดับ ดังตารางที่ 6



ภาพที่ 8 สัดส่วนการแพร่กระจายของปริมาณแคดเมียมในแต่ละรูปเคมี หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542



ภาพที่ 8 (ต่อ)

SOL=แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน EXC =แคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้)
Ca = แคดเมียมรูปคาร์บอเนต) Fe/Mn = แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส
OM = แคดเมียมรูปออร์แกนิก) RES = แคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด)

จะเห็นได้ว่า หลังการบ่มดินนาน 60 วัน การใส่ยิปซัมมีผลต่อให้สัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ มีสัดส่วนลดลงในขณะที่แคดเมียมในรูปทางเคมีที่มีสภาพไม่พร้อมใช้ทางชีวภาพมีสัดส่วนการกระจายมากขึ้นมากกว่าชุดดินที่ไม่ใส่ยิปซัม โดยเมื่อพิจารณาจากถึง สัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในกลุ่มที่มีสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 5 mg/kg ในชุดดินที่เป็นดินร่วนเหนียวที่มีการผสมยิปซัมในอัตรา 4 และ 8% มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพน้อยกว่าชุดดินที่ไม่มีการเติมยิปซัม 8.58 และ 5.30% ส่วนในชุดดินที่เป็นดินร่วนที่มีการผสมยิปซัมในอัตรา 4 และ 8% มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพน้อยกว่าชุดดินที่ไม่มีการเติมยิปซัม 3.19 และ 3.97% และในชุดดินที่เป็นดินร่วนทรายที่มีการผสมยิปซัมในอัตรา 4 และ 8% มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพน้อยกว่าชุดดินที่ไม่มีการเติมยิปซัม 13.22 และ 13.79% และที่ระดับของการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg ในชุดดินที่เป็นดินร่วนเหนียวที่มีการผสมยิปซัมในดินที่อัตรา 4 และ 8% มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพน้อยกว่าชุดดินที่ไม่มีการเติมยิปซัม 9.99 และ 10.80% ส่วนในชุดดินที่เป็นดินร่วนที่มีการผสมยิปซัมในอัตรา 4 และ 8% มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพน้อยกว่าชุดดินที่ไม่มีการเติมยิปซัม 9.18 และ 6.68% และในชุดดินที่เป็นดินร่วน

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

ทรายที่มีการผสมยิปซัมในอัตรา 4 และ 8% มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพน้อยกว่าชุดดินที่ไม่มีการเติมยิปซัม 9.27 และ 9.77% ตามลำดับ ดังตารางที่ 6

แต่หากพิจารณาถึงความแตกต่างของระดับอัตราการใส่ยิปซัมลงในดินทั้งสองอัตรา พบว่าการใส่ยิบซัมในปริมาณที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปพร้อมใช้ทางชีวภาพอย่างงชัดเจน โดยพบว่า สัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปพร้อมใช้ทางชีวภาพมีสัดส่วนการกระจายตัวใกล้เคียงกันทั้ง 3 ชุดดิน แต่หากพิจาณาถึงชนิดของดินและอัตราการปนเปื้อนแคดเมียมในดินจะเห็นได้ว่า มีผลอย่างเห็นได้ชัดต่อปริมาณและสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในสภาพร้อมใช้ทางชีวภาพ แสดงให้เห็นถึงแคดเมียมที่ถูกดูดซับในดินจะถูกปลดปล่อยออกมามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมมากขึ้น(ปภามญชุ์ ชีประเสริฐ, พัฒนา อนุรักษ์พงศธร และสิรินาฎ เลาโรจนพันธ์, 2554, น.285) และสมบัติของดินก็นับเป็นปัจจัยหลักมีผลต่อการดูดซับและการแพร่กระจายและการเปลี่ยนรูปทางเคมีของแคดเมียมในความเข้มข้นต่าง ๆ ในดิน (จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2552, น.89) ซึ่งการจะอธิบายถึงอิทธิพลของปัจจัยเหล่านี้ จำเป็นต้องมีการศึกษาความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยเพื่อบ่งชี้ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมในดินทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 6 การแพร่กระจายของแคดเมียมในแต่ละรูปทางเคมีในดินทั้ง 3 ชนิด หลังจากบ่มดินนาน 60 วัน

ชนิดดิน	อัตราการปนเปื้อนแคดเมียม	อัตราการใส่ยิปซัม	รูปทางเคมีของแคดเมียม (mg/kg)						SUM	สภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ	
			SOL	EXC	CA	Fe-Mn	OM	RES		Available form(%)	Unavailable form(%)
ร่วนเหนียว	5 mg/kg	0%	0.05	2.37	1.45	0.97	0.58	0.36	5.78	41.09	58.91
		4%	0.17	1.72	1.42	0.73	0.66	0.60	5.31	32.52	67.48
		8%	0.21	1.86	1.47	0.73	0.47	0.48	5.22	35.79	64.21
		Mean	0.15	1.98	1.45	0.81	0.57	0.48	5.43		
	30 mg/kg	0%	4.07	15.42	4.32	4.16	0.73	1.55	30.25	55.04	44.96
		4%	3.94	12.49	5.34	4.53	0.80	3.28	30.39	45.06	54.94
		8%	4.51	12.24	5.80	4.28	0.72	3.26	30.80	44.24	55.76
		Mean	4.17	13.38	5.15	3.99	0.75	2.70	30.15		

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 6 (ต่อ)

ชนิดดิน	อัตราการปนเปื้อนแคดเมียม	อัตราการใส่ยิปซัม	รูปทางเคมีของแคดเมียม (mg/kg)							สภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ	
			SOL	EXC	CA	Fe-Mn	OM	RES	รวม	Available form (%)	Unavailable form (%)
ร่วน											
	5 mg/kg	0%	0.72	1.19	1.3	0.73	0.52	0.58	5.04	24.33	75.67
		4%	0.81	1.1	1.49	0.81	0.46	0.74	5.41	21.14	78.86
		8%	0.7	1.06	1.47	0.8	0.44	0.92	5.39	20.37	79.63
		Mean	0.74	1.12	1.42	0.78	0.47	0.75			
	30 mg/kg	0%	10.03	10.06	2.82	2.86	0.65	3.82	30.24	43.30	56.70
		4%	10.59	7.12	4.32	3.33	0.68	4.22	30.26	34.12	65.88
		8%	10.55	7.86	4.03	3.04	0.57	4.1	30.15	36.62	63.38
		Mean	10.39	8.35	3.72	3.08	0.63	4.05			
ร่วนทราย	5 mg/kg	0%	1.06	1.91	1.30	0.61	0.29	0.31	5.49	35.89	64.11
		4%	1.11	1.13	1.49	0.64	0.59	0.27	5.23	22.67	77.33
		8%	1.08	1.10	1.47	0.60	0.51	0.47	5.22	22.11	77.89
		Mean	1.08	1.38	1.42	0.62	0.46	0.35			
	30 mg/kg	0%	10.94	10.42	2.82	2.02	0.76	3.42	30.38	45.25	54.75
		4%	11.05	7.58	4.32	2.49	0.70	4.27	30.40	35.97	64.03
		8%	11.24	7.32	4.03	2.54	0.73	4.36	30.22	35.48	64.52
		Mean	11.08	8.44	3.72	2.35	0.73	4.02			

SOL=แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน EXC =แคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้)

Ca = แคดเมียมรูปคาร์บอเนต) Fe/Mn = แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส

OM = แคดเมียมรูปออร์แกนิก) RES = แคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด)

% Available form = (SOL+EXC)

% Unavailable form = (CA+Fe-Mn+OM+RES)

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ความสัมพันธ์ระหว่างรูปทางเคมีของแคดเมียมกับอัตราการใส่ยิปซัม และสมบัติดินทั้ง 3 ชนิด

หลังการใส่ยิปซัมที่อัตรา 0, 4 และ 8 % ของนำหนักดิน และเติมสารละลายแคดเมียม ($CdCl_2$) ส่งผลให้ความเข้มข้นของแคดเมียมทั้ง 6 รูปทางเคมี มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน (ตารางที่ 7-9) และแสดงรูปแบบการแพร่กระจายของแคดเมียมในรูปทางเคมีต่าง ๆ ได้แก่ รูปอิสระในสารละลายดิน (Water soluble-bound: SOL), รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable-bound: EXC), รูปคาร์บอเนต (Carbonate-bound: CA), รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn Oxide-bound: Fe-Mn) รูปอินทรีย์ (Organic matter-bound: OM) และรูปที่คงเหลือจากการสกัด (Residue: RES) ตามช่วงระยะเวลา 7 ช่วงระยะเวลา (ภาพที่ 3-8) เพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนขึ้น นอกจากยังแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอัตรายิปซัมที่แตกต่างกันที่มีผลต่อของแคดเมียมในรูปเคมีต่าง ๆ

จากการสกัดลำดับขั้นตามวิธีของ Tessier (1979, p.846) พบว่าแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดิน (SOL) และแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (EXC) ซึ่งจัดว่าเป็นรูปทางเคมีที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (McLaughlim, 2001, p.335) พบว่าปัจจัยของอัตรายิปซัมที่ต่างกันมีผลต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดิน (SOL) และรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (EXC) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เมื่อพิจารณาค่าสหสัมพันธ์ของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินและรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีทิศทางลบสูงกับอัตราการใส่ยิปซัมแต่กลับพบว่าแคดเมียมทั้ง 2 รูป มีค่าสหสัมพันธ์สูงทางบวกกับ ค่า pH ของดินและค่า pH ของดินมีค่าสหสัมพันธ์สูงทางบวกกับอัตราการใส่ยิปซัม แสดงให้เห็นว่า ปริมาณยิปซัมที่ใส่ลงในดินนั้นมีบทบาทสำคัญที่ทำให้ค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่า pH ที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลต่อการแพร่กระจายของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ โดยค่า pH ของดินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้แคดเมียมละลายออกมาอยู่ในรูปอิสระในสารละลายดินได้น้อยลง (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540, น.259) และเมื่อพิจารณาค่าสหสัมพันธ์ของแคดเมียมรูปที่อยู่ รูปอิสระในสารละลายดินกับปริมาณดินเหนียว พบว่า มีทิศทางลบสูงกับปริมาณดินเหนียว (ปริมาณดินเหนียวมากแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินน้อย) แสดงให้เห็นได้ว่าปริมาณดินเหนียวมีบทบาทสำคัญต่อแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน จะเห็นได้ว่าชุดดินที่เป็นดินเหนียวจะดูดซับแคดเมียมรูปที่อิสระในสารละลายดินได้มากกว่าชุดดินที่เป็นดินร่วนและดินทราย

ผลกระทบของอัตราการใส่ยิปซัม ระยะเวลา และความเข้มข้นของแคดเมียมที่แสดงในตารางที่ 7, 8 และ 9 แสดงให้เห็นถึงเข้มข้นของแคดเมียมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในทุกรูปทางเคมีของแคดเมียม ในทุกช่วงเวลาและทุกชุดดิน ความสัมพันธ์ของ อัตราการใส่ยิปซัม

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

ระยะเวลาและระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เติมลงในดินส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ยกตัวอย่างเช่น ที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg เมื่อบ่มดินนาน 60 วัน ในดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน ส่งผลให้แคดเมียมในรูปที่เป็นประโยชน์ (SOL+EXC) ในดินร่วนเหนียว ดินร่วน และดินร่วนทราย มีสันส่วนการกระจายตัวน้อยกว่าดินที่ไม่ใส่ยิปซัม โดยมีสัดส่วนการกระจายตัวอยู่ที่ 44.24% 36.62% และ 35.48% ของปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน ในขณะที่ชุดดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมรูปที่พร้อมใช้ทางชีวภาพอยู่ในระดับ 55.04% 43.30% และ 45.25% ในทางตรงกันข้าม ที่อัตราการใส่ยิปซัม 8% ของนำหนักดินส่งผลให้แคดเมียมรูปที่ไม่พร้อมใช้ทางชีวภาพ (CA+Fe-Mn+OM+RES) ในดินร่วนเหนียว ดินร่วน และดินร่วนทราย มีสันส่วนการกระจายตัวมากกว่าดินที่ไม่ใส่ยิปซัม โดยมีสัดส่วนการกระจายตัวอยู่ที่ 55.76% 63.38% และ 64.52% ของปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน ในขณะที่ชุดดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม มีสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมรูปที่ไม่พร้อมใช้ทางชีวภาพอยู่ในระดับ 44.96% 59.76% และ 54.75% นอกจากอัตราการใส่ยิปซัมแล้ว จะเห็นได้ว่าเนื้อดินยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน ชุดดินที่มีลักษณะเนื้อดินที่ต่างกันมีผลให้การดูดซับแคดเมียมต่างกันด้วย (จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2552, น.99) นอกจากนั้น ระยะเวลาการบ่มดินยังทีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมในดินอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ดังจะเห็นได้จาก ภาพที่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของแคดเมียมทั้ง 6 รูป ซึ่งระยะเวลาที่บ่มดินมีความสัมพันธ์ทางลบกับแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินและแคดเมียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ซึ่งเป็นแคดเมียมในรูปที่พร้อมใช้ทางชีวภาพ ในทางตรงกันข้ามระยะเวลาที่บ่มดินกลับมีความสัมพันธ์ทางบวกกับแคดเมียมในรูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส รูปออร์แกนิก และรูปที่เหลือจากการสกัด ซึ่งเป็นแคดเมียมกลุ่มที่อยู่ในสภาพไม่พร้อมใช้ทางชีวภาพ กล่าวได้ว่าเมื่อมีการปนเปื้อนแคดเมียมมานาน แคดเมียมจะถูกปลดปล่อยออกมาได้น้อยลง ซึ่งในพื้นที่ที่มีการแคดเมียมมานาน แคดเมียมจะถูกปลดปล่อยออกมาได้น้อย (ปภามญชุ์ ชีประเสริฐ, พัฒนา อนุรักษ์พงศธร และสิรินาฎ เลาหะโรจนพันธ์, 2559, น.291)

การเปลี่ยนค่า pH ของดินหลังการทดลอง

จากภาพที่ 8 พบการเปลี่ยนของค่า pH ในดินร่วนเหนียวตามช่วงเวลาพบว่า pH มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการบ่มดิน (60 วัน) ซึ่งที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) ค่า pH ของดินไม่เพิ่มขึ้นมาก (เพิ่มขึ้น 0.07) ในขณะที่ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินมีค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นจาก 6.19 เป็น 6.44 (เพิ่มขึ้น 0.25) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดินมีค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นจาก 6.28 เป็น

323307754 URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

6.61 (เพิ่มขึ้น 0.33) ส่วนที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) มีค่า pH ของดินลดลงจาก 6.81 เป็น 6.48 (ลดลง 0.33) แต่ในดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน มีค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นจาก 6.48 เป็น 6.61 (เพิ่มขึ้น 0.13) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน มีค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นจาก 6.19 เป็น 6.44 (เพิ่มขึ้น 0.25) ซึ่งเห็นได้ว่าการเติมยิปซัมลงในดินมีผลทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้น

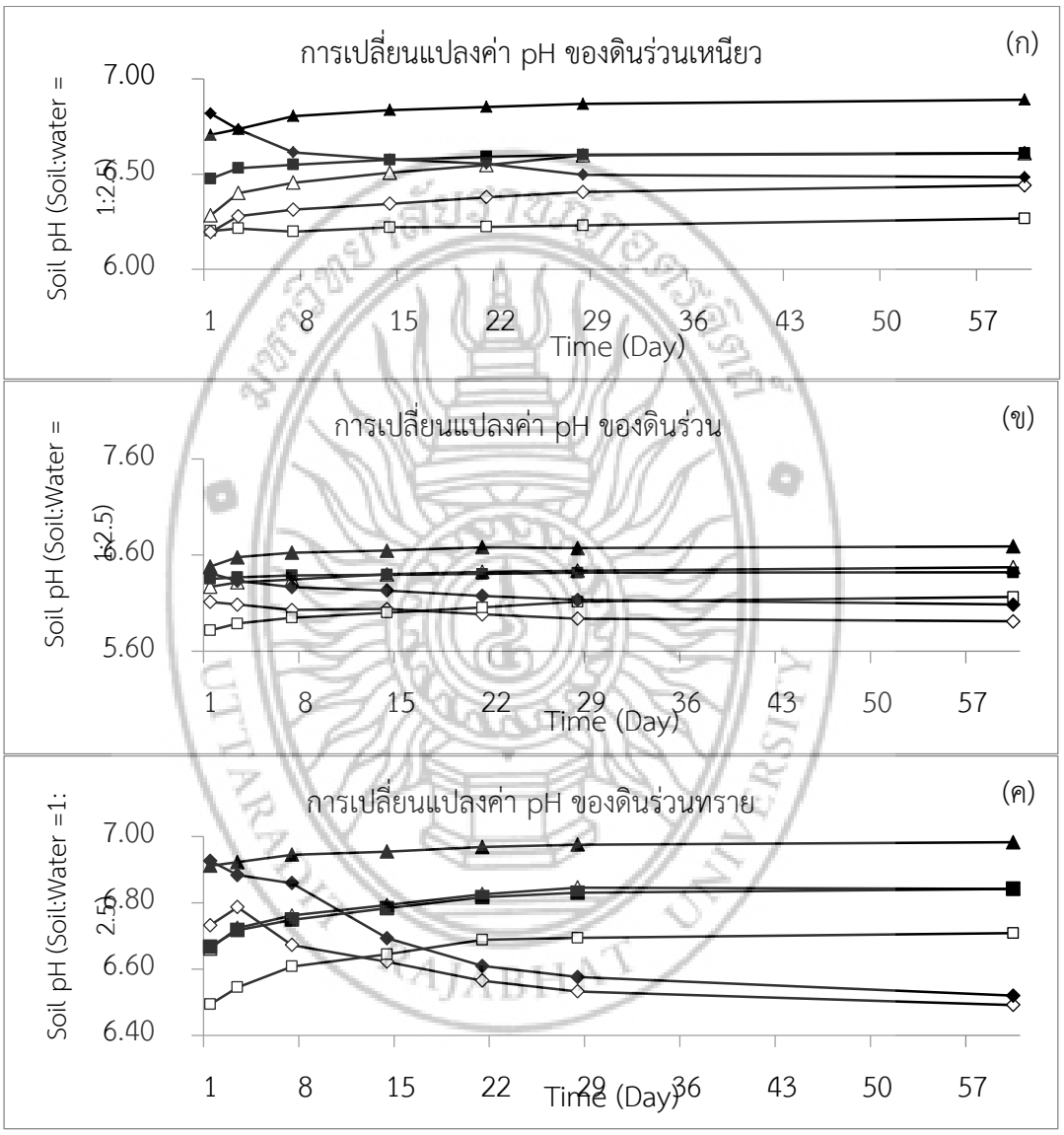
การเปลี่ยนของค่า pH ในดินร่วนตามช่วงเวลาของการบ่มดินพบว่า pH ของดินมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการบ่มดิน (60 วัน) ซึ่งที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) ค่า pH ของดินลดลงจาก 6.11 เป็น 5.91 (ลดลง 0.20) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินมีค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นจาก 5.82 เป็น 6.16 (เพิ่มขึ้น 0.34) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดินมีค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นจาก 6.27 เป็น 6.48 (เพิ่มขึ้น 0.21) ส่วนที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) มีค่า pH ของดินลดลงจาก 6.41 เหลือ 6.09 (ลดลง 0.32) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน มีค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นจาก 6.35 เป็น 6.42 (เพิ่มขึ้น 0.07) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน มีค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นจาก 6.48 เป็น 6.69 (เพิ่มขึ้น 0.21) จะเห็นได้ว่ายิปซัมสามารถเพิ่มระดับ pH ของดินได้

การเปลี่ยนของค่า pH ในดินร่วนทรายตามช่วงเวลาพบว่า pH ของดินมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการบ่มดิน (60วัน) เช่นกัน ซึ่งที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg พบว่า ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม(ควบคุม) ค่า pH ของดินลดลงจาก 6.73 เป็น 6.49 (ลดลง 0.24) ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดินมีค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นจาก 6.49 เป็น 6.71 (เพิ่มขึ้น 0.22) ส่วนดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดินมีค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นจาก 6.66 เป็น 6.84 (เพิ่มขึ้น 0.18) ส่วนที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg พบว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) มีค่า pH ของดินลดลงจาก 6.93 เป็น 6.52 (ลดลง 0.41) ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน มีค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นจาก 6.67 เป็น 6.84 (เพิ่มขึ้น 0.17) ส่วนดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน มีค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นจาก 6.91 เป็น 6.98 (เพิ่มขึ้น 0.07)

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใส่ยิปซัมลงไปในดิน มีผลต่อการยกระดับ ค่า pH ของดินในทุกชนิดที่นำมาทดลอง โดยจะเห็นว่าค่า pH ของดินในชุดดินที่มีการใส่ยิปซัมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาบ่มดินเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1-7 วันแรก ในขณะที่ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม พบว่า ค่า pH ของดินลดลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มดินเพิ่มขึ้น (ดังภาพที่ 9) ซึ่งค่า pH ของดิน เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดิน โดยค่า pH ของดินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พืชสามารถดูดซึมโลหะหนักได้น้อยลง เนื่องจากไอออนของโลหะหนักในรูปที่เปลี่ยนประจุได้และละลายน้ำได้จะลดลงเมื่อค่า pH ของดินเพิ่มขึ้น ตะกั่วและโครเมียมในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

พืชและจุลินทรีย์ไม่สามารถที่จะดูดซึมได้ เนื่องจากส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่มีการละลายและเคลื่อนที่ได้น้อย ขณะที่แคดเมียมสามารถเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่า pH ระหว่าง 4.5 ถึง 5.5 ขณะที่ดินที่เป็นด่างแคดเมียมไม่ค่อยเคลื่อนที่ (ไพบูลย์ วิวัฒนาวงศ์วนา, 2546, น.171)



ภาพที่ 9 แสดงการเปลี่ยนค่า pH ของดินหลังการทดลอง

◇, □, △ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 % SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเท่ากับ 5 mg/kg

◆, ■, ▲ หมายถึง อัตราการใส่ยิปซัม 0, 4, 8 % SDW ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินเท่ากับ 30 mg/kg

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

บทที่ 5
สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

อิทธิพลของอัตราการใส่ยิปซัมต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมในดินทั้งหมด 6 รูป ในระยะเวลาที่แคดเมียมตกค้างในดินต่างกัน ชุดดินที่ต่างกัน และระดับการปนเปื้อนแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน ที่มีผลต่อรูปทางเคมีและการแพร่กระจายของแคดเมียมทั้ง 6 รูปในดิน โดยการวิจัยนี้ใช้อัตราการใส่ยิปซัมสังเคราะห์จากกระบวนการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ 3 ระดับ คือ 0, 4, และ 8 % ของน้ำหนักดิน และระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 2 ระดับ คือ 5 และ 30 mg/kg ใช้ดินตัวแทนจากพื้นที่ปลูกยาสูบซึ่งมีเนื้อดินต่างกัน 3 ชุดดิน เป็นตัวแทนชุดดิน มีปัจจัยที่ศึกษาแล้ว ได้แก่ ระดับการปนเปื้อนแคดเมียมในดิน อัตราการใส่ยิปซัม และการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมตามช่วงระยะเวลาการบ่มดิน วิเคราะห์ข้อมูล ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติแบบปัจจัยเดียว (one-way ANOVA) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี least significant difference (LSD) เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปัจจัยด้วยวิธี t-test ($p<0.05$) และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในแต่ละรูปเคมีตามช่วงระยะเวลาหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษาด้วยค่าสหสัมพันธ์ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลสรุปผลได้ดังนี้

1. การใส่ยิปซัมลงในดินในอัตราที่ต่างกันมีผลให้ทำแคดเมียมรูปที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (รูปอิสสระในสารละลายดินและรูปที่แลกเปลี่ยนได้) มีปริมาณความเข้มข้นและสัดส่วนการกระจายตัวลดลง (ลดลง 10.80 %) เมื่อระยะเวลาการบ่มดินเพิ่มขึ้น ในขณะที่แคดเมียมในรูปที่อยู่ในสภาพไม่พร้อมใช้ทางชีวภาพ (รูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส รูปออร์แกนิกและรูปที่เหลือจากการสกัด) มีปริมาณเพิ่มขึ้น มีปริมาณความเข้มข้นและสัดส่วนการกระจายตัวเพิ่มขึ้น

2. ระดับการปนเปื้อนแคดเมียมในดินที่ต่างกัน มีผลทำให้ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมทั้ง 6 รูปมีปริมาณและสัดส่วนการกระจายตัวที่ต่างกัน สัมพันธ์กับกระรับการปนเปื้อนเริ่มต้น โดยระดับการปนเปื้อนที่สูงขึ้นมีผลทำให้แคดเมียมทั้ง 6 รูป มีปริมาณและสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมที่สูงขึ้น

3. ระยะเวลาการบ่มดินมีผลทำให้แคดเมียมที่อยู่ในรูปทางเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพลดลง ในขณะเดียวกันแคดเมียมในรูปทางเคมีที่ไม่พร้อมใช้ทางชีวภาพมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งพบว่า ในดิน

3233077542 URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ที่มีการใส่ยิปซัม มีผลให้แคดเมียมมีการเปลี่ยนรูปทางเคมีจากรูปทางเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพ เป็นแคดเมียมในรูปทางเคมีที่ไม่พร้อมใช้ทางชีวภาพได้มากกว่าดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม

4. สมบัติดินที่ต่างกันมีผลทำให้ดินมีการดูดซับและแพร่กระจายแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พร้อมใช้ทางชีวภาพต่างกัน โดยในชุดดินตัวแทนที่เป็นดินร่วนเหนียวมีการดูดซับแคดเมียมมากที่สุด รองลงมาได้แก่ชุดดินร่วน และ ชุดดินร่วนทราย ตามลำดับ

5. การใส่ยิปซัมในดินในผลทำให้ให้ค่า pH ของดินเพิ่มขึ้น โดยผลของการใส่ยิปซัมในอัตรา 4 และ 8% ของน้ำหนักดินแห้ง มีผลให้ชุดดินตัวแทนที่เป็นดินร่วนเหนียว มีค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 6.22 เป็น 6.61 และ 6.89 ดินร่วน มีค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 5.71 เป็น 6.50 และ 6.69 ส่วนในดินร่วนทรายมีค่า pH ของดิน เพิ่มขึ้นจาก 6.42 เป็น 6.84 และ 6.98 ตามลำดับ ซึ่งค่า pH ของดินมีความสัมพันธ์ทางบวกกับอัตราการใส่ยิปซัม (r=0.995)

อภิปรายผล

จากผลการวิจัย การใส่ยิปซัมในดินมีผลให้แคดเมียมรูปที่เป็นประโยชน์ (รูปอิสสระในสารละลายดินและรูปที่แลกเปลี่ยนได้) ซึ่งเป็นแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พืชสามารถดูดซับและเคลื่อนย้ายในสารละลายดินได้ดี มีปริมาณความเข้มข้นลงลงมากกว่าในดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม และมีแนวโน้มว่าแคดเมียมรูปที่เป็นประโยชน์จะมีปริมาณความเข้มข้นลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มดินเพิ่มขึ้น ในขณะที่แคดเมียมรูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส รูปออร์แกนิกและรูปที่เหลือจากการสกัดซึ่งเป็นแคดเมียมในรูปที่ไม่พร้อมใช้ทางชีวภาพ และเคลื่อนที่ได้น้อย มีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ (จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2552, น.83) รูปทางเคมีของแคดเมียมมีการกระจายเพิ่มขึ้น/ลดลง ตามระยะเวลาที่บ่มดิน โดยแคดเมียมในรูปที่เป็นประโยชน์มีปริมาณความเข้มข้นลดลง ส่วนแคดเมียมรูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส รูปออร์แกนิก และรูปที่เหลือจากการสกัดมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการใส่ยิปซัมในดินมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียม เนื่องจากยิปซัมมีสมบัติเป็นด่าง สามารถยกระดับ pH ของดินให้สูงขึ้นได้ และมีองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ซึ่งสามารถลดความเป็นพิษของแคดเมียมลงได้ในระดับหนึ่ง ดังจะเห็นได้จากการวิจัยของ Yubo Yan Xiaoli Dong (2014, p.20) และ Yang et al. (2015, pp.35-36) ในขณะที่การใช้ยิปซัมปรับปรุงดินที่ใช้ปลูกพืชยังช่วยลดการสะสมโลหะหนักในพืชได้ ซึ่งการใช้ยิปซัมปรับปรุงดินไม่ส่งผลกระทบในด้านลบกับพืชที่ปลูกถึงแม้จะใส่ในอัตราที่สูงก็ตาม (ยุทธ์ดนัย ยอดทองดี, 2555, น.87) แสดงให้เห็นว่ายิปซัมเป็นวัสดุปรับปรุงดินชนิดหนึ่งซึ่งจะเป็นทางเลือกที่ดีสำรับเกษตรกรที่จะนำไปใช้ปรับปรุงดินเพื่อลดผลกระทบของแคดเมียมในดินได้ และยังเป็นทางเลือกในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินทั่วไปได้

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินที่ใช้ทดลอง

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ในกลุ่มชุดดินทั้ง 3 ชุด พบว่า มีปริมาณอินทรียวัตถุต่ำ มีค่า CEC ต่างกันตามเนื้อดิน และมีเนื้อดินที่ต่างกัน โดยในชุดดินที่ 7 มีอนุภาคดินเหนียวเป็นองค์ประกอบอยู่สูง ซึ่งช่วยให้มีผลต่อความสามารถดูดยึดไอออนของแคดเมียมที่มีประจุบวก (Cd^{2+}) ไว้ที่ผิวดินได้ดี (จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2552, น.87) ส่วนชุดดินที่ 38 มีอนุภาคดินเหนียวปานกลาง ในขณะที่ชุดดินที่ 56 มีอนุภาคดินเหนียวในปริมาณน้อย และค่า pH ของดินที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 5.71-6.50 จะทำให้แคดเมียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ไม่ละลายและเคลื่อนที่ได้น้อย ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของดิน ขึ้นอยู่กับสมบัติดิน ได้ แก่ pH ปริมาณอินทรียวัตถุ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก และปริมาณดินเหนียว (ปภามญชุ์ ซีประเสริฐ, พัฒนา อนุรักษ์พงศธร และสิรินาฎ เลาโรจนพันธ์, 2554, น.291) ซึ่งค่า pH เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดิน การใส่ยิปซัมลงในดินสามารถปรับปรุงค่า pH ของดินได้โดยส่งผลให้ค่า pH ดินเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้แคดเมียมที่อยู่ในรูปพร้อมใช้ทางชีวภาพมีการเคลื่อนที่ได้น้อยลง ดังนั้นพืช จุลินทรีย์ดิน และสิ่งมีชีวิตในดินมีโอกาสที่จะดูดซึมแคดเมียมไปสะสมไว้ได้น้อยลง อีกทั้งปริมาณดินเหนียวและอินทรียวัตถุที่ต่างกันย่อมส่งผลต่อการควบคุมรูปทางเคมีของแคดเมียมและการแพร่กระจายของแคดเมียมในดิน (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540, น.84)

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน

จากข้อมูลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงและการแพร่กระจายของแคดเมียมในดิน 3 ชนิด ที่บ่มดินนาน 60 วัน จะเห็นได้ว่าในชุดดินที่มีสภาพเป็นกรดอ่อน-ปานกลางทำให้แคดเมียมอยู่ในรูปอิสระในสารละลายดินมากกว่าสภาพที่เป็นด่าง ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของดินเมื่อนำมาเรียงลำดับพบว่า ชุดดินที่มีเนื้อดินประเภทดินเหนียวดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่าชุดดินที่มีเนื้อดินประเภทดินร่วนมากกว่าชุดดินที่มีเนื้อดินประเภทดินทราย ความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินมีผลต่อการดูดซับแคดเมียม โดยชุดดินที่มีปริมาณอนุภาคดินเหนียวน้อยและมีค่า pH ต่ำจะทำให้แคดเมียมอยู่ในรูปพร้อมใช้ทางชีวภาพได้มากกว่า ถูกดูดซับไว้ในดิน และผลจากการใส่ยิปซัมในดินยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินและรูปที่แลกเปลี่ยนได้มีปริมาณลดลงในทุกชนิดดิน ในขณะที่แคดเมียมรูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส รูปออแกนิกและรูปที่เหลือจากการสกัดมีปริมาณเพิ่มขึ้น ดังนี้

แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน (SOL) ในทุกชุดดินการใส่ยิปซัมในดินมีผล รูปอิสสระในสารละลายดิน ซึ่งเป็นแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พืชสามารถดูดซับและเคลื่อนย้ายในสารละลายดินได้ดีมีปริมาณความเข้มข้นลงลงมากกว่าในดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม และมีแนวโน้มว่าแคดเมียมรูปที่เป็นประโยชน์จะมีปริมาณความเข้มข้นลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มดินเพิ่มขึ้น ในขณะที่แคดเมียมรูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส รูปออร์แกนิก และรูปที่เหลือจากการสกัดมีปริมาณ

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

เพิ่มขึ้น โดยสามารถเรียงลำดับค่าเฉลี่ยของปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg ได้ดังนี้ ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน< ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน< ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม ส่วนดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) < ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน < ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน และเมื่อเปรียบเทียบตามชุดดินแล้วจะเห็นว่าในชุดดินที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียวมีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินน้อยกว่า ชุดดินที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วน และน้อยกว่าชุดดินที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วนทราย แสดงให้เห็นว่าปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินขึ้นกับอัตราการใส่ยิปซัม เนื่องมาจากยิปซัมมีองค์ประกอบหลักที่เป็นแคลเซียม (Ca) และซัลเฟตในปริมาณสูง เมื่อละลายน้ำทำให้เกิดการแตกตัวของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554, น.121) ทำให้ดินดูดซับไอออนของแคลเซียมไว้ในอนุภาคดินเหนียวได้มากขึ้น ดินจึงสามารถแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้ลดลง ในดินที่มีการใส่ยิปซัมจึงดูดซับแคดเมียมได้น้อยลง ทำให้มีปริมาณแคดเมียมในรูปอิสระในสารละลายดินมากกว่า ดินที่ไม่มีการผสมยิปซัมปริมาณแคดเมียมที่เติมลงในดิน

แคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (EXC) ในทุกชุดดินการใส่ยิปซัมในดินมีผลทำให้ แคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ซึ่งเป็นแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พืชสามารถดูดซับและเคลื่อนย้ายในสารละลายดินมีปริมาณความเข้มข้นน้อยกว่าชุดดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม และมีแนวโน้มว่าแคดเมียมรูปที่เป็นประโยชน์จะมีปริมาณความเข้มข้นลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มดินเพิ่มขึ้น โดยสามารถเรียงลำดับค่าเฉลี่ยของปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg ได้ดังนี้ ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน < ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน< ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg ได้ดังนี้ ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) < ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน < ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน และเมื่อเปรียบเทียบตามชุดดินแล้วจะเห็นว่าในชุดดินที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วนทรายมีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดินน้อยกว่า ชุดดินที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วนและน้อยกว่าชุดดินที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียว แสดงให้เห็นว่าการเติมยิปซัมลงในดินมีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ทั้งนี้เนื่องจาก การใส่ยิปซัมลงไปในดินมีผลทำให้ดินมีการดูดซับไอออนของแคดเมียมได้น้อยลง เป็นผลมาจากยิปซัมมีองค์ประกอบหลักที่เป็นแคลเซียม (Ca) และซัลเฟตในปริมาณสูง เมื่อละลายน้ำทำให้เกิดการแตกตัวของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และ ซัลเฟตตไอออน (SO_4^{2-}) ทำให้ไอออนของแคลเซียมถูกดูดซับไว้ในอนุภาคดินเหนียวได้มากขึ้น ดินจึงสามารถแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้ลดลง ในดินที่มีการใส่ยิปซัมจึงดูดซับแคดเมียมได้น้อยลง

323307754 2 URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ประกอบกับการใส่ยิปซัมมีผลทำให้ดินมีค่า pH เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้แคดเมียมมีการละลายออกมาได้น้อยลง (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554, น.120-121)

แคดเมียมรูปคาร์บอเนต (Ca) ในทุกชุดดินการใส่ยิปซัมในดินมีผล แคดเมียมรูปคาร์บอเนต ซึ่งเป็นแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พืชดูดซับและเคลื่อนย้ายในสารละลายดินได้น้อย มีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมากกว่าในดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัมเล็กน้อย และแคดเมียมรูปคาร์บอเนต (Ca) จะมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มดินเพิ่มขึ้น โดยสามารถเรียงลำดับค่าเฉลี่ยของปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปคาร์บอเนต (Ca) ที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg ได้ดังนี้ ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน < ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน< ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg ได้ดังนี้ ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน < ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) < ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน และเมื่อเปรียบเทียบตามชุดดินแล้วจะเห็นว่าปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปคาร์บอเนตในแต่ละชุดดินมีปริมาณความเข้มข้นต่างกัน แสดงให้เห็นว่าปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปคาร์บอเนต จะมีปริมาณความเข้มข้นมากหรือน้อย ตามปริมาณอัตรายิปซัมที่ใส่ลงไปในดิน ระดับการปนเปื้อนแคดเมียมใน และระยะเวลาการบ่มดินสอดคล้องกับงานวิจัยของ จันทร์เพ็ญ ชุมแสง (2552, น.83-84)

แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn) ในทุกชุดดินการใส่ยิปซัมในดินมีผล แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn) มีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมากกว่าในดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัมเล็กน้อย โดยแตดเมียมออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1-14 วันหลังบ่มดิน ความเข้มข้นของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn) ที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg ได้ดังนี้ ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน< ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน < ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัมและที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg ได้ดังนี้ ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน < ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) < ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน ซึ่งหากพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใส่ยิปซัมและปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส (Fe-Mn) จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับปานกลาง ซึ่งทั้งนี้เนื่องจากยิปซัมมีองค์ประกอบของ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) ที่ทำปฏิกิริยากับไอออนของแคดเมียม(Cd^{2+}) ได้ (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554, น.8; Yubo Yan Xiaoli Dong, 2014, p.70; Chindaprasirt et al., 2011, p.3199) ทำให้ในดินที่มีการใส่ยิปซัมมีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสมากกว่าชุดดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของยิปซัมต่อแคดเมียมในรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส แต่หากพิจารณา

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ถึงอัตราการเพิ่มข้นของแคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีสในดิน ทั้งที่มีการใส่และไม่ใส่ยิปซัม ยังพบว่า มีสัดส่วนการเพิ่มขึ้นไม่ต่างกัน

แคดเมียมรูปออร์แกนิก (OM) ในทุกชุดดินการใส่ยิปซัมในดินไม่มีผลต่อระดับการเปลี่ยนแปลงแคดเมียมออร์แกนิก (OM) มีปริมาณเพิ่มขึ้นในระดับใกล้เคียงกันทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องมาจากยิปซัมเป็นสารอนินทรีย์ (ยุทธ์ดนัย ยอดทองดี, 2555, น.8) การใส่ยิปซัมที่ไม่มีสารอินทรีย์จึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมในรูปออร์แกนิก โดยแคดเมียมออร์แกนิก (OM) มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1-14 วันหลังบ่มดิน แต่หากหากพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใส่ยิปซัมและปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในออร์แกนิก (OM) จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับค่อนข้างสูง แสดงว่ายิปซัมเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้แคดเมียมในรูปออร์แกนิกมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น และยิปซัมยังเป็นสารปรับปรุงดินชนิดหนึ่ง การใส่ยิปซัมที่ใส่ลงในดินทำให้สภาพดินมีความเหมาะสมในการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างดินและอากาศ ดินมีสภาพรีดอกซ์ดีขึ้น ทำให้จุลินทรีย์ในดินที่ใช้ออกซิเจนเจริญเติบโตได้ดี (จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2552, น.17) และจุลินทรีย์บางชนิดมีความสามารถในการลดการสะสมของแคดเมียมในพืชได้ (อภิญญา พิมพ์ทอง, 2556, น.68)

แคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด (RES) ในทุกชุดดินการใส่ยิปซัมในดินมีผล แคดเมียมรูปเหลือจากการสกัด (RES) ซึ่งเป็นแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พืชไม่สามารถดูดซับและเคลื่อนย้ายในสารละลายดินได้ มีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมากกว่าในดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัมอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ในชุกชุดดินและมีแนวโน้มว่าแคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด (RES) จะมีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มดินเพิ่มขึ้น โดยสามารถเรียงลำดับค่าเฉลี่ยของปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปเหลือจากการสกัด (RES) ที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 5 mg/kg ได้ดังนี้ ดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม < ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน < ดินที่มีการใส่ยิปซัมในอัตรา 8% ของน้ำหนักดิน และที่ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม 30 mg/kg ได้ดังนี้ ดินที่ใส่ยิปซัมในดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม (ควบคุม) < อัตรา 4% ของน้ำหนักดิน < ดินที่ใส่ยิปซัมในอัตรา 4% ของน้ำหนักดิน และเมื่อเปรียบเทียบตามชุดดินแล้วจะเห็นว่าปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมรูปเหลือจากการสกัด(RES) ในแต่ละชุดดินมีปริมาณความเข้มข้นที่ต่างกัน แสดงให้เห็นว่าสมบัติของชุดดินมีผลต่อประสิทธิภาพของยิปซัมในการลดความเป็นพิษของแคดเมียม แต่หากพิจารณาถึงอัตราการใส่ยิปซัมลงในดิน จะพบว่า ปริมาณยิปซัมที่ใส่ลงในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปเหลือจากการสกัด (RES) ในทางบวกสูง (r^2 =99.60) แสดงให้เห็นว่ายิปซัมมีศักยภาพในการบำบัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินได้ เนื่องจากยิปซัมมีองค์ประกอบของธาตุบางชนิด เช่น ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) ที่เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นไอออนที่สามารถรวมตัวกับแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ได้และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ที่ตกตะกอนและเคลื่อนย้ายในสารละลายดินได้ยาก (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554, น.8; Y. Dong, 2014, p.70; Chindaprasirt et al., 2011, p.3199) นอกจากนี้ยิปซัมเองยังส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้น มีผลทำให้แคดเมียมไอออนในสารละลายดินมีการรวมตัวกับซัลเฟตและตกตะกอนได้ในรูปแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) (กรมความคุมมลพิษ, 2541, น.65)

สัดส่วนการกระจายของรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า หลังการบ่มดินนาน 60 วัน การใส่ยิปซัมมีผลให้สัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพมีสัดส่วนลดลง ในขณะที่แคดเมียมในรูปทางเคมีที่มีสภาพไม่พร้อมใช้ทางชีวภาพมีสัดส่วนการกระจายมากขึ้นมากกว่าชุดดินที่ไม่ใส่ยิปซัม เนื่องมาจากยิปซัมมีองค์ประกอบของธาตุบางชนิด เช่น ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) ที่สามารถรวมตัวกับแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ได้และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ และเคลื่อนย้ายในสารละลายดินได้ยาก (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554, น.8; Yubo Yan Xiaoli Dong, 2014, p.70; Chindaprasirt et al., 2011, p.3200) โดยเมื่อพิจารณาจากถึง สัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในกลุ่มที่มีสภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ พบว่า ในดินร่วนทรายมีสัดส่วนการกระจายของแคดเมียมรูปพร้อมใช้ทางชีวภาพลดลงมากที่สุด รองลงมาคือดินร่วนเหนียวและดินร่วน ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากชุดดินที่ใช้มีสมบัติดินที่ต่างกันทั้งทางกายภาพและเคมี ซึ่งสมบัติดินเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน (จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2552, น.87) โดยเฉพาะเนื้อดินและค่า pH ของดิน ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อสภาพการละลายได้ การเคลื่อนย้ายและการดูดซับโลหะหนักของดิน (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540, น.84-85)

แต่หากพิจารณาถึงความแตกต่างของระดับอัตราการใส่ยิปซัมลงในดินทั้งสองอัตรา พบว่าการใส่ยิบซัมในปริมาณที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปพร้อมใช้ทางชีวภาพ โดยพบว่า สัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปพร้อมใช้ทางชีวภาพมีสัดส่วนการกระจายตัวใกล้เคียงกันทั้ง 3 ชุดดิน แต่หากพิจาณาถึงชนิดของดินและอัตราการปนเปื้อนแคดเมียมในดินจะเห็นได้ว่า มีผลอย่างมากต่อปริมาณและสัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในสภาพร้อมใช้ทางชีวภาพ แสดงให้เห็นถึงแคดเมียมที่ถูกดูดซับในดินจะถูกปลดปล่อยออกมามากขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมมากขึ้น (ปภามญชุ์ ซีประเสริฐ, พัฒนา อนุรักษ์พงศธร และสิรินาฎ เลาโรจนพันธ์, 2554, น.285) และสมบัติของดินก็นับเป็นปัจจัยหลักมีผลต่อการดูดซับและการแพร่กระจายและการเปลี่ยนรูปทางเคมีของแคดเมียมในความเข้มข้นต่าง ๆ ในดิน (จันทร์เพ็ญ ชุมแสง, 2552, น.89)

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

อิทธิพลของยิปซัมต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดินหลังทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูล แสดงให้เห็นว่า การใส่ยิปซัมลงไปในดิน มีผลต่อการยกระดับค่า pH ของดินในทุกชนิดที่นำมาทดลอง โดยจะเห็นแนวโน้มว่าค่า pH ของดินในชุดดินที่มีการใส่ยิปซัมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาบ่มดินเพิ่มขึ้น ในขณะที่ชุดดินควบคุม พบว่าค่า pH ของดินลดลงเมื่อระยะเวลาในการบ่มดินเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากยิปซัมมีสมบัติเป็นด่าง (pH 8.08) การใส่ยิปซัมลงในดินที่มีสภาพเป็นกรด จึงสามารถยกระดับค่า pH ของดินให้สูงขึ้น (ภาพที่ 9) ซึ่งค่า pH ของดิน เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดเกี่ยวพันกับการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน โดยค่า pH ของดินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พืชสามารถดูดซึมโลหะหนักได้น้อยลง เนื่องจากไอออนของโลหะหนักในรูปที่เปลี่ยนประจุได้และละลายน้ำได้จะลดลงเมื่อค่า pH ของดินเพิ่มขึ้น ซึ่งแคดเมียมสามารถเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่า pH ระหว่าง 4.5 ถึง 5.5 ขณะที่ดินที่เป็นด่างแคดเมียมไม่ค่อยเคลื่อนที่ ซึ่งในสภาพดินกรดสารละลายได้ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมและปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (ไพบูลย์ วิวัฒนาวงศ์วนา, 2546, น.171; ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540, น.259) โดย pH เพิ่มขึ้น มีผลทำให้แคดเมียมไอออนในสารละลายดินมีการรวมตัวกับซัลเฟตและตกตะกอนได้ในรูปแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) (กรมความคุมมลพิษ, 2541, น.65)

การใส่ยิปซัมในดินมีอิทธิพลทำให้ให้แคดเมียมในดินที่อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ (รูปอิสสระในสารละลายดินและรูปที่แลกเปลี่ยนได้) ซึ่งเป็นแคดเมียมในรูปทางเคมีที่พืชสามารถดูดซับและเคลื่อนย้ายในสารละลายดินได้ดี มีปริมาณความเข้มข้นลงลงมากกว่าในดินที่ไม่มีการใส่ยิปซัม ซึ่งแคดเมียมรูปที่เป็นประโยชน์จะมีปริมาณความเข้มข้นลดลงเมื่อระยะเวลาการบ่มดินเพิ่มขึ้น ในขณะที่แคดเมียมรูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส รูปออร์แกนิกและรูปที่เหลือจากการสกัดซึ่งเป็นแคดเมียมในรูปที่ไม่พร้อมใช้ทางชีวภาพ และเคลื่อนที่ได้น้อย มีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยการเปลี่ยนรูปทางเคมีของแคดเมียมจะเกิดขึ้นในช่วง 1-14 วันหลังบ่มดิน สอดคล้องกับปภามญชุ์ ซีประเสริฐ, พัฒนา อนุรักษ์พงศธร และสิรินาฎ เลาโรจนพันธ์ (2554, น.291) ที่รายงานว่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียมขึ้นอยู่กับสมบัติของดิน ได้แก่ pH ปริมาณอินทรียวัตถุ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกและปริมาณดินเหนียว โดยการปลดปล่อยแคดเมียมจะมีมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมมากขึ้น และการปลดปล่อยแคดเมียมขึ้นอยู่กับระยะเวลาการปนเปื้อนของแคดเมียม โดยพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนมานานแคดเมียมจะถูกปลดปล่อยออกมาน้อย และจันทร์เพ็ญ ชุมแสง (2552, น.89) ได้รายงานว่า รูปทางเคมีของแคดเมียมมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น/ลดลง ตามระยะเวลาที่บ่มดิน โดยแคดเมียมในรูปที่เป็นประโยชน์มีปริมาณความเข้มข้นลดลง ส่วนแคดเมียมรูปคาร์บอเนต รูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส รูปออร์แกนิก และรูปที่เหลือจากการสกัดมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการใส่ยิปซัมในดินมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมในดิน เนื่องจากยิปซัมมีสมบัติเป็นด่าง (pH 8.08) สามารถยกระดับ pH ของดินให้

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

สูงขึ้นได้ ซึ่งค่า pH ของดินเพิ่มขึ้น มีผลทำให้แคดเมียมไอออนในสารละลายดินมีการรวมตัวกับซัลเฟตและตกตะกอนได้ในรูปแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) (กรมความคุมมลพิษ, 2541, น.65) และยิปซัมยังสามารถลดความเป็นพิษของแคดเมียมลงได้ในระดับหนึ่ง ดังจะเห็นได้จากการวิจัยของ Yubo Yan Xiaoli Dong (2014, p.20) และ Yang et al., (2015, pp.35-36) ที่พบว่า ยิปซัมมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียได้ 24.6 % และสามารถกำจัดแคดเมียมในดินชั้นบน (0-30 ซ.ม.) ได้ 30.5 % ตามลำดับ ในขณะที่การใช้ยิปซัมปรับปรุงดินที่ใช้ปลูกพืชยังช่วยลดการสะสมโลหะหนักในพืชได้ ซึ่งการใช้ยิปซัมปรับปรุงดินไม่ส่งผลกระทบในด้านลบกับพืชที่ปลูกถึงแม้จะใส่ในอัตราที่สูงก็ตาม (ยุทธ์ดนัย ยอดทองดี, 2555, น.165) นอกจากนี้ยิปซัมยังมีองค์ประกอบของธาตุบางชนิด เช่น ซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) ที่สามารถรวมตัวกับแคดเมียม (Cd) ได้และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ และเคลื่อนย้ายในสารละลายดินได้ยาก (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554, น.8; Yubo Yan Xiaoli Dong, 2014, p.70; Chindaprasirt et al., 2011, p.3200) แสดงให้เห็นว่ายิปซัมเป็นวัสดุปรับปรุงดินชนิดหนึ่งซึ่งจะเป็นทางเลือกที่ดีสำรับเกษตรกรที่จะนำไปใช้ปรับปรุงดินเพื่อลดผลกระทบของแคดเมียมในดินได้ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ประสบปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียม และยังเป็นทางเลือกในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินทั่วไปได้ เนื่องจากมีธาตุแคลเซียมและกำมะถันเป็นองค์ประกอบ (นุจรินทร์ ศิริวาลย์, 2554, น.19)

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะการนำงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

จากผลการวิจัย แสดงให้เห็นว่ายิปซัมเป็นวัสดุปรับปรุงดินอีกชนิดที่เป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับเกษตรกรสามารถนำไปใช้เพื่อลดความเป็นพิษของแคดเมียมในดินได้ โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน ทั้งยังสามารถยกระดับค่า pH ของดินให้สูงขึ้นได้ และเป็นแหล่งธาตุอาหารรองของพืช

2. ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมปัจจัยสิ่งแวดล้อมและระยะเวลาที่จำกัด ดั้งนั้นในการวิจัยต่อไปควรทำการวิจัยในระยะเวลาที่มากขึ้นหรือทดลองในสภาพพื้นที่แปลงเพาะปลูกจริง เพื่อให้เข้าใจการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของแคดเมียมภายใต้สิ่งแว
ทางธรรมชาติ ระยะเวลาที่มากขึ้นและการดูดซับแคดเมียมของพืชในแปลงเพาะปลูกนั้น

323307754 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

บรรณานุกรม

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

บรรณานุกรม

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

บรรณานุกรม

กนกนพ กลิ่นลออ, โกติเย่ แลนรอด และ แสงดาว เขาแก้ว. (2556). การเพิ่มการละลายของแคดเมียมในดินนาปนเปื้อนแคดเมียม. ใน *รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 51* (น.210-218). กรุงเทพฯ: สาขาวิทยาศาสตร์, สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

กรมควบคุมมลพิษ. (2541). *แคดเมียม (Cadmium).* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: อินทิเกรเต็ดโปรโมชัน เทคโนโลยี.

กรมควบคุมมลพิษ. (2547). *รายงานผลการตรวจสอบและประเมินการปนเปื้อนของสารแคดเมียมในบริเวณลุ่มน้ำห้วยแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก.* กรุงเทพฯ: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2554). *แนวทางการฟื้นฟูดินปนเปื้อนจากการประกอบการอุตสาหกรรม.* กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ, สำนักเทคโนโลยีน้ำและสิ่งแวดล้อมโรงงาน.

กรมวิชาการเกษตร. (2558). *ระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทย*. สืบค้น 25 สิงหาคม 2558, จาก http://www.agriqua.doae.go.th/organic/soil/soil1/soil1.html.

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2547). *การปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก* [เอกสารวิชาการ]. กรุงเทพฯ: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ สำนักบริหารและฟื้นฟู.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. (2541). *ปฐพีวิทยาเบื้องต้น.* (พิมพ์ครั้งที่ 8). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จันทร์เพ็ญ ชุมแสง. (2552). *ผลกระทบทางนิเวศวิทยาของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินบางชนิดของไทยต่อสิ่งมีชีวิตในดิน.* วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

จันทร์เพ็ญ ชุมแสงและณิชารีย์ ใจคำวัง. (2558). สถานะธาตุอาหารและปริมาณแคดเมียมในไร่ยาสูบในระบบเคมี จังหวัดสุโขทัย. ใน *บทคัดย่อ การประชุมใหญ่โครงการส่งเสริมการวิจัยอุดมศึกษา ครั้งที่ 3*. (น.63-65) กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา.

จุฑาภรณ์ ผลิตัน. (2556). *การปรับปรุงเสถียรภาพดินจากการสลายตัวของหินดินดานโดยวิธีใช้ซีเมนต์ เถ้าลอย และกากเอฟจีดียิปซัมเป็นสารผสมเพิ่ม.* วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. (2525). *สารานุกรมธาตุ.* กรุงเทพฯ: อินเดียนสโตร์.

ชุลีมาศ บุญไทย อิวาย. (2548). *นิเวศวิทยาการประเมินความเสี่ยงและผลกระทบของมลพิษสิ่งแวดล้อมด้านระบบนิเวศ (Ecotoxicology and Ecological Rick Assessment).* ขอนแก่น: คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ดาวรุ่ง สังข์ทอง และวิทยาภรณ์ คงอยู่. (2559). รูปฟอร์มของตะกั่วและแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์. *Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University, 3* (6), 295-309.

ทัศนางกูล ตุลยากรณ์. (2553). *การใช้ฟอสโฟยิปซัมดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ.* วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธเรศ ศรีสถิตย์. (ม.ป.ป.). *เทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักในดินและตะกอนลำน้ำ.* [เอกสารวิชาการ]. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธวัชชัย ศุภดิษฐ์. (2546). *การจัดการอนามัยสิ่งแวดล้อม.* กรุงเทพฯ: หลักสูตรการจัดการสิ่งแวดล้อม สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษา สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

ธวัชชัย ศุภดิษฐ์. (2548). *สิ่งแวดล้อม นิเวศวิทยา และการจัดการ.* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: เพิ่มพูนการพิมพ์.

นุจรินทร์ ศิริวาลย์ (2554). การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ยิปซัมเพื่อความยั่งยืนทางการเกษตร. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร, 5* (1), 118-126.

ปภามญชุ์ ซีประเสริฐ, พัฒนา อนุรักษ์พงศธร และสิรินาฎ เลาหะโรจนพันธ์. (2555). *การดูดซับและการปลดปล่อยแคดเมียมในดินนาข้าว.* ใน รายงานการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยขอนแก่น ครั้งที่ 12. (น.285-291). ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ปรีชา บุณจง, วิภาวี เสาหิน, ธีรวุฒ แลหะ, ปกาศิต การกระสัง และสุรินทร์ เยาว์ด้วง. (2550). การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในผลิตภัณฑ์ยาสูบ. *วารสารเภสัชศาสตร์อีสาน (IJPS), 3* (1), 36-42.

ปิยะ ดวงพัตรา. (2553). *สารปรับปรุงดิน.* (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปิยะดา วชิระวงศกร, สิรินรัตน์ รอดขาว และ เจนจิรา ช่วยปุ่น. (2558). การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการบริโภคผักประเภทใบที่มีการปนเปื้อนสารตะกั่วและแคดเมียม: กรณีศึกษาเขตภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย. *Rajabhat J. Sci. Humenlt. Soc. Sci., 16* (2), 167-177.

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

พิดาลัด วงศ์พานิช. (2548). *การปนเปื้อนของแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อม: กรณีศึกษาลุ่มน้ำห้วยแม่ตาว ตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก.* สารนิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

ไพบูรย์ วิวัฒนาวงศ์วนา. (2546). *เคมีดิน.* เชียงใหม่: เชียงใหม่พิมพ์สวย.

ยุทธ์ดนัย ยอดทองดี. (2555). *การปลดปล่อยโลหะหนักบางชนิดจากดินผสมเอฟจีดียิปซัมด้วยเทคนิคการชะแบบคอลัมน์.* วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

รจนา ชุณหบัณฑิต. (ม.ป.ป). *แคดเมียม ปัญหาจากสิ่งแวดล้อมกับการเกิดมะเร็ง* [เอกสารเผยแพร่]. กรุงเทพฯ: สำนักงานวิจัย คณะแพทยศาสตร์ โรงพยาบาลรามาธิบดี.

ราชบัณฑิตยสถาน. (2556). *พจนานุกรม ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2554 เฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ เนื่องในโอกาสพระราชพิธีมหามงคลเฉลิมพระชนมพรรษา7 รอบ 5 ธันวาคม 2554*. กรุงเทพฯ: ศิริวัฒนาอินเตอร์พริ้นท์.

วราภร สิทธินาง. (255). *การเตรียมวัสดุดูดซับจากของผสมของเถ้าหนักกับเอฟจีดียิปซัมสำหรับการดูดซับสีย้อม*. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วิภาวรรณ กิติวัชระเจริญ. (ม.ป.ป.). *ยาสูบพืชเศรษฐกิจของไทย.* [เอกสารวิชาการ]. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยพืชไร่ กรมวิชาการเกษตร.

วิรานุช หลาง. (2551). *จุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม.* กรุงเทพฯ: คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. (2540). *มลพิษของดินจากการใช้สารเคมี.* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานเกษตรจังหวัดสุโขทัย. (2558). *สถานการณ์ผลิตพืชเศรษฐกิจสำคัญของจังหวัดสุโขทัย.* [เอกสารวิชาการ]. สุโขทัย: สำนักงานเกษตรจังหวัดสุโขทัย.

สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. (2532). *เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการเรื่อง แคดเมียม.* กรุงเทพฯ: กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.

สุกาญจน์ รัตนเลิศนุสรณ์. (2550). *หลักการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน.* (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

อภิญญา พิมพ์ทอง. (2556). *การใช้ใบโอชาร์และจุลินทรีย์ในการลดการสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม.* วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อุทิศ เกตุทัต. (2535). ยาสูบ. ใน *สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน* (เล่มที่15, น.59-81). กรุงเทพฯ: เครือข่ายกาญจนาภิเษก.

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

Agassi, M., I, Shainberg, and J. Morin. (1990). Slop, aspect and phosphogypsum effects on runoff and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J*., 54, 162-165.

BEL. (2002). Draft rick assessment report-cadmium metal and cadmium oxide. Ministry of Social Affair, Public Health and the Environment. *Belgian Federal Department of the Environment Quality,* 34, 49-63.

Chindaprasirt, P., K. Boonserm, T. Chairuangsri, W. Vichit-Vadakan, T. Eaimsin, T. Sato and K. Pimraksa. (2011). Plaster materials from waste calcium sulfate containing chemicals, organic fibers and inorganic additives. *Const. Build. Mater.* 25 (8), 3193-3203.

David Butt, Kim Dowling and Peter Vinden. (2008). Assessment of Cadmium Distribution in Some Australian Krasnozems by Sequential Extraction. *Water Air Soil Pollution,* 190, 157-169.

Dunnick, J.K. and Fowler, B.A. (1998). *Cadmium in Handbook on toxicity of inorganic compound*. Marcel Dekker: INC, New York and Basel.

E. Álvarez-Ayuso, X. Querol and A. Tomás. (2008). Implications of moisture content determination in the environmental characterisation of FGD gypsum for its disposal in landfills. *Journal of Hazardous Materials*, 153 (1-2), 544-550.

Hickey, M.G., Kittrick, J.A. (1984). Chemical partitioning of Cd, Cu, Ni and Zn in solution sediments containing high levels of heavy mental. *Journal of Environmental Quality,* 13, 372-376.

Krishna Murti, C. R., et al. (1987). "Group Report: Cadmium". In T. C. Hutchinson and K. M. Meema (Eds.). *Lead, Mercury, Cadmium and Arsenic in the Environment*. Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) 31. New York: John Wiley & Sons.

Liao HC, Jiang SJ. (1999). Determination of cadmium, mercury and lead in coal fly ash by slurry sampling electrothermal vaporization inductively coupled plasma mass spectrometry. *Spectrochim Acta Part B*, 54 (8), 1233–1234.

Liphadzi, M.S. and Kirkham, M.B. (2006). Chelate-assissted heavy metal removeal by sunflower to improve soil with sludge. *Journal of Crop Improvement.* 16, 153-172.

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

Lugon-Moulin, Z., N. Gadain, M., Rossi, F., Krauss, D., Wangner, G.J.M,. (2004). Critical revive of the science and option for reducing cadmium in tobacco (Nicotinna tabacum L.) and other plant. *Advances in Agronomy,* 83, 111-180.

McLaren, R. G. B., C.A., Rate, A.W., Switt, R.S. (1998). Cadmium and cobalt desorption kinetics from soil clay, Effect of sorption period. *Soil Science Society of America Journal,* 62, 332-337.

Ping Yang, Xian Li, Ze-Jun Tong, Qu-Sheng Li, Bao-Yan He, Li-Li Wang, Shi-Hong Guo and Zhi-Min Xu. (2016). Use of flue gas desulfurization gypsum for leaching Cd and Pb in reclaimed tidal flat soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 23 (8), 7840–7848.

Purves, D. (1977). Trace element contamination of the environment. Fundamental aspects of forest soil. *Environmental Science and Technology, 138*, 29-50.

Rana, S. V. S. (2006). *Environmental Pollution: Health and Toxicology*. Oxford, UK: Alpha Science international Lid.

Sauev, S., Norvell, W.A., Mcbride, M. and Hendershot, W. (2009). Speciation and complexation of cadmium in extracted soil solutions. *Environment Science and and Thectology*. 34, 291-296

Stanley, D. (1992). What a waste-phosphogypsum enriches the Soil. *Agric. Res.J ARS*, 12-13.

Tessier, A., Campbell,P.G.C., Bisso, M,. (1979). Sequnetial extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry,* 51, 844-851.

United States Environmental Protection Agency. (1993). *Clean Water Act. sec. 5039,* 58 (32).

Vig, K., Megharaj, M., Sethunathan, N., and Naido R. (2003). Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganism and their activities in soil: areview. *Advances in Environmental Research*. 8, 121-135.

Yubo Yan Xiaoli Dong, X. S., Xiuyun Sun, Jiansheng Li, Jinyou Shen, Weiqing Han, Xiaodong Liu, Lianjun Wang,. (2014). Conversion of waste FGD gypsum into hydroxyapatite for removal of Pb^{2+} and Cd^{2+} from wastewater. *Journal of Colloid and Interface Science,* 429 (2014), 68–76.

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

Zarcinas, B.A., Ishak, C.F., MaLaughlin, M.J., and Cozens. (2004). Heavy metal in soil and crops in southeast Asia.Peninsular Malaysia. *Environmental Geochemistry and Health.* 26, 343-357.

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ภาคผนวก

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ภาคผนวก ก

การแปลผลสมบัติทางเคมีของดิน และระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนัก

การแปลความหมายค่า pH ของดินในน้ำ

ระดับ	ช่วง pH water, 1:1
กรดรุนแรงมากที่สุด	< 3.5
กรดรุนแรงมาก	3.5 – 4.4
กรดจัดมาก	4.5 – 5.0
กรดจัด	5.1 – 5.5
กรดปานกลาง	5.6 – 6.0
กรดเล็กน้อย	6.1 – 6.5
เป็นกลาง	6.6 – 7.3
ด่างอ่อน	7.4 – 7.8
ด่างปานกลาง	7.9 – 8.4
ด่างจัด	8.5 – 9.0
ด่างจัดมาก	> 9.0

การแปรผลระดับอินทรียวัตถุในดิน

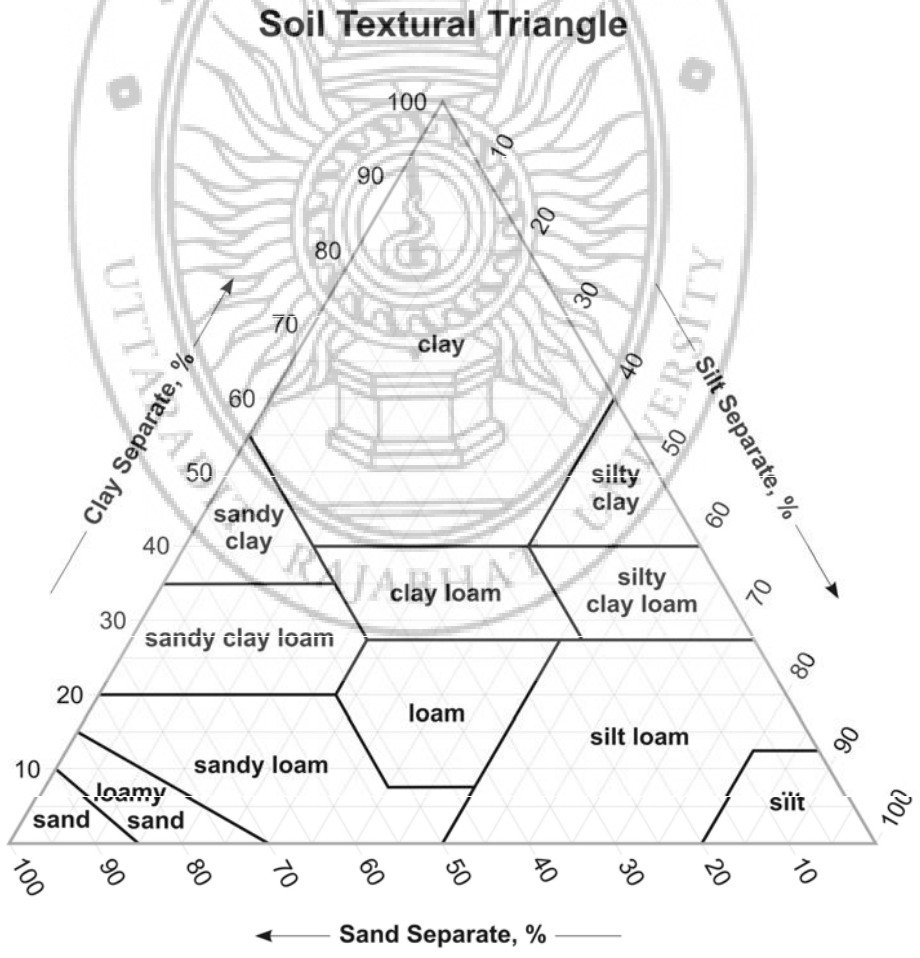
ระดับ (rating)	%OM
ต่ำมาก	< 0.5
ต่ำ	0.5 – 1.0
ค่อนข้างต่ำ	1.0 – 1.5
ปานกลาง	1.5 – 2.5
ค่อนข้างสูง	2.5 – 3.5
สูง	3.5 – 4.5
สูงมาก	> 4.5

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

การแปรผลระดับปริมาณความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน

CEC, $cmol_c$ /kg	ระดับ
< 5	ต่ำมาก
5 – 15	ต่ำ
15 – 25	ปานกลาง
25 – 40	สูง
> 40	สูงมาก

การแปลผลการวิเคราะห์เนื้อดิน



ภาพที่ 10 แสดงตารางสามเหลี่ยมแจกแจงประเภทเนื้อดิน

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน, 2553, น.125

323077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในดิน และค่าสูงสุดของโลหะหนัก

โลหะหนัก	ระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในดิน[1/]	ระดับเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักในดิน[2/]	ค่าสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในปุ๋ยอินทรีย์[3/]	ค่ากำหนดที่ยอมให้มีได้ในกากตะกอนที่จะนำไปใช้ในการเกษตร[4/]
สารหนู	-	30	50	-
แคดเมียม	3	0.15	5	20
โคบอลต์	100	20	-	-
โครเมียม	100	80	300	1,000
ทองแดง	100	45	500	900
ปรอท	1	0.1	2	10
นิเกิล	50	45	-	400
ตะกั่ว	100	55	500	1,000
สังกะสี	300	70	-	3,000

[1/] ที่มา: มาตรฐานของโลหะหนักในดิน กลุ่มประเทศสหภาพยุโรป

[2/] ที่มา: เอกสารวิชาการ “ระดับเกณฑ์พื้นฐาน” ของการปนเปื้อนโลหะหนักในดินประเทศไทย

[3/] ที่มา: มาตรฐานปุ๋ยอิทรีย์ พ.ศ. 2548 กรมวิชาการเกษตร

[4/] ที่มา: วารสารดินและปุ๋ย ปีที่ 20 เล่มที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2541

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ภาคผนวก ข

การเปลี่ยนแปลงเข้มข้นของแคดเมียมในรูปเคมีต่าง ๆ ในดินหลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน

ตารางที่ 7 การเปลี่ยนแปลงเข้มข้นของแคดเมียมในรูปเคมีต่าง ๆ (mg/kg) ในดินร่วนเหนียวหลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน (ข้อมูลตัวเลขในตารางเป็นค่าเฉลี่ย N=4)

ชนิดดิน/ รูปทางเคมี	อัตราการปนเปื้อน Cd	อัตราการใส่ยิปซัม	ระยะเวลาในการบ่มดิน (วัน)							ค่าเฉลี่ย[2]
			1	3	7	14	21	28	60	
Silty Clay SOL[1]										
	5 mg/kg [2]	0 %	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07	0.06	0.05	0.08b
		4 %	0.40	0.36	0.34	0.30	0.25	0.22	0.17	0.29a
		8 %	0.40	0.36	0.31	0.27	0.24	0.22	0.21	0.29a
		Mean	0.31	0.27	0.24	0.21	0.19	0.17	0.15	
	30 mg/kg	0 %	4.26	4.22	4.17	4.15	4.14	4.13	4.07	4.16b
		4 %	4.64	4.53	4.45	4.20	4.10	4.01	3.94	4.27b
		8 %	4.76	4.61	4.57	4.51	4.48	4.47	4.51	4.56a
		Mean	4.55	4.45	4.39	4.29	4.24	4.20	4.17	
EXC										
	5 mg/kg	0 %	3.38	3.28	2.95	2.83	2.66	2.49	2.37	2.85a
		4 %	2.57	2.48	2.29	2.23	2.06	1.81	1.72	2.16b
		8 %	2.75	2.62	2.38	2.17	2.02	1.91	1.86	2.24b
		Mean	2.90	2.79	2.54	2.41	2.25	2.07	1.98	
	30 mg/kg	0 %	17.33	16.94	16.61	16.13	15.85	15.55	15.42	16.26a
		4 %	15.43	14.83	14.40	13.19	12.98	12.67	12.49	13.71b
		8 %	14.93	14.79	14.12	13.42	12.72	12.40	12.24	13.52b
		Mean	15.90	15.52	15.04	14.25	13.85	13.54	13.38	
Ca										
	5 mg /kg	0 %	1.16	1.17	1.28	1.39	1.37	1.38	1.45	1.31a
		4 %	1.19	1.20	1.25	1.31	1.28	1.34	1.42	1.29a
		8 %	1.20	1.32	1.38	1.36	1.45	1.45	1.47	1.38a
		Mean	1.19	1.23	1.31	1.35	1.37	1.39	1.45	
	30 mg/kg	0 %	3.90	4.08	4.12	4.26	4.27	4.26	4.32	4.17c
		4 %	3.74	4.35	4.84	5.15	5.19	5.25	5.34	4.83b
		8 %	4.55	4.68	4.98	5.35	5.60	5.70	5.80	5.24a
		Mean	4.06	4.37	4.65	4.92	5.02	5.07	5.15	

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 7 (ต่อ)

ชนิดดิน/ รูปทางเคมี	อัตราการปนเปื้อน Cd	อัตราการใส่ยิปซัม	ระยะเวลาในการบ่มดิน (วัน)							ค่าเฉลี่ย[2)]
			1	3	7	14	21	28	60	
Fe-Mn[1)]										
	5 mg/kg	0 %	0.63	0.69	0.71	0.74	0.80	0.90	0.97	0.78a
		4 %	0.53	0.54	0.57	0.62	0.66	0.67	0.73	0.62b
		8 %	0.35	0.37	0.58	0.63	0.71	0.71	0.73	0.58b
		Mean	0.50	0.54	0.62	0.66	0.72	0.76	0.81	
	30 mg/kg	0 %	3.31	3.40	3.42	3.54	3.91	4.01	4.16	3.68b
		4 %	3.55	3.69	3.73	3.66	3.83	4.05	4.53	3.86a
		8 %	2.61	2.72	2.91	2.99	3.05	3.24	3.28	2.97c
		Mean	3.16	3.27	3.35	3.40	3.60	3.77	3.99	
OM										
	5 mg/kg	0 %	0.23	0.32	0.36	0.39	0.48	0.51	0.58	0.41a
		4 %	0.23	0.24	0.31	0.43	0.55	0.63	0.66	0.43a
		8 %	0.24	0.30	0.35	0.41	0.46	0.47	0.47	0.38b
		Mean	0.23	0.29	0.34	0.41	0.50	0.54	0.57	
	30 mg/kg	0 %	0.22	0.26	0.34	0.46	0.55	0.64	0.73	0.46a
		4 %	0.28	0.32	0.35	0.53	0.62	0.74	0.80	0.52a
		8 %	0.22	0.24	0.39	0.54	0.61	0.64	0.72	0.48a
		Mean	0.24	0.28	0.36	0.51	0.59	0.67	0.75	
RES										
	5 mg/kg	0 %	0.21	0.27	0.27	0.34	0.35	0.35	0.36	0.31b
		4 %	0.41	0.47	0.52	0.53	0.56	0.58	0.60	0.52a
		8 %	0.33	0.34	0.36	0.39	0.41	0.44	0.48	0.39b
		Mean	0.32	0.36	0.38	0.42	0.44	0.46	0.48	
	30 mg/kg	0 %	1.19	1.29	1.39	1.46	1.50	1.52	1.55	1.41b
		4 %	2.63	2.78	2.99	3.12	3.18	3.25	3.28	3.03a
		8 %	2.83	2.86	2.94	2.93	3.12	3.20	3.26	3.02a
		Mean	2.22	2.31	2.44	2.51	2.60	2.66	2.70	

[1)] SOL(แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน), EXC (แคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้), Ca (แคดเมียมรูปคาร์บอเนต), Fe/Mn (แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส), OM (แคดเมียมรูปออร์แกนิก), RES (แคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด)

[2)] รูปเคมีเดียวกันและความเข้มข้นของแคดเมียมเดียวกันตัวเลขในช่องสดมภ์เดียวกันที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (Least Significant Difference: LSD)

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 8 การเปลี่ยนแปลงเข้มข้นของแคดเมียมในรูปเคมีต่าง ๆ (mg/kg) ในดินร่วนหลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน (ข้อมูลตัวเลขในตารางเป็นค่าเฉลี่ย N=4)

ชนิดดิน/ รูปทางเคมี	อัตราการปนเปื้อน Cd	อัตราการใส่ยิปซัม	ระยะเวลาในการบ่มดิน (วัน)							ค่าเฉลี่ย[2)]
			1	3	7	14	21	28	60	
Loam SOL[1)]										
	5 mg/kg	0 %	1.02	0.94	0.92	0.86	0.81	0.78	0.72	0.86a
		4 %	1.33	1.20	1.04	0.94	0.93	0.86	0.81	1.02a
		8 %	1.32	1.25	0.96	0.84	0.74	0.72	0.70	0.93a
		Mean	1.22	1.13	0.97	0.88	0.83	0.79	0.74	
	30 mg/kg	0 %	10.29	10.20	10.17	10.10	10.08	10.05	10.03	10.13b
		4 %	11.61	11.33	11.03	10.93	10.86	10.65	10.59	11.00a
		8 %	11.08	10.88	10.80	10.78	10.66	10.61	10.55	10.77a
		Mean	10.99	10.80	10.67	10.60	10.53	10.44	10.39	
EXC										
	5 mg/kg	0 %	2.11	2.05	1.80	1.64	1.48	1.33	1.19	1.66a
		4 %	1.84	1.64	1.54	1.39	1.32	1.23	1.10	1.44a
		8 %	1.87	1.70	1.56	1.47	1.32	1.22	1.06	1.46a
		Mean	1.94	1.80	1.63	1.50	1.37	1.26	1.12	
	30 mg/kg	0 %	11.83	11.46	10.81	10.75	10.48	10.39	10.06	10.83a
		4 %	9.63	8.65	8.69	8.52	8.33	8.13	8.12	8.58b
		8 %	10.08	9.80	9.14	8.46	8.20	8.00	7.86	8.79b
		Mean	10.51	9.97	9.55	9.24	9.00	8.84	8.68	
CA										
	5 mg /kg	0 %	1.12	1.15	1.17	1.18	1.21	1.23	1.30	1.20a
		4 %	1.19	1.30	1.35	1.39	1.39	1.42	1.49	1.36a
		8 %	1.25	1.29	1.32	1.34	1.38	1.44	1.47	1.36a
		Mean	1.19	1.25	1.28	1.30	1.33	1.36	1.42	
	30 mg/kg	0 %	2.45	2.51	2.63	2.68	2.72	2.78	2.82	2.65c
		4 %	3.27	3.37	3.80	3.97	4.13	4.24	4.32	3.87a
		8 %	3.29	3.39	3.50	3.59	3.68	3.86	4.03	3.62b
		Mean	3.00	3.09	3.31	3.41	3.51	3.63	3.72	

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 8 (ต่อ)

ชนิดดิน/ รูปทางเคมี	อัตราการปนเปื้อน Cd	อัตราการใส่ยิปซัม	ระยะเวลาในการบ่มดิน (วัน)							ค่าเฉลี่ย[2]
			1	3	7	14	21	28	60	
Fe-Mn[1]	5 mg/kg	0 %	0.45	0.46	0.57	0.61	0.66	0.70	0.73	0.60a
		4 %	0.54	0.55	0.63	0.75	0.78	0.80	0.81	0.69a
		8 %	0.45	0.45	0.63	0.70	0.75	0.76	0.80	0.65a
		Mean	0.48	0.49	0.61	0.69	0.73	0.75	0.78	
	30 mg/kg	0 %	2.07	2.24	2.41	2.54	2.64	2.75	2.86	2.50b
		4 %	2.29	2.52	2.91	3.00	3.04	3.27	3.33	2.91a
		8 %	2.16	2.26	2.57	2.74	2.88	2.91	3.04	2.65ab
		Mean	2.17	2.34	2.63	2.76	2.85	2.98	3.08	
OM	5 mg/kg	0 %	0.12	0.17	0.24	0.31	0.46	0.50	0.52	0.33a
		4 %	0.12	0.13	0.23	0.27	0.42	0.45	0.46	0.30a
		8 %	0.13	0.14	0.21	0.23	0.30	0.39	0.44	0.26a
		Mean	0.12	0.15	0.23	0.27	0.39	0.45	0.47	
	30 mg/kg	0 %	0.21	0.33	0.34	0.52	0.60	0.62	0.65	0.47a
		4 %	0.18	0.24	0.36	0.41	0.56	0.63	0.68	0.44a
		8 %	0.24	0.27	0.39	0.54	0.39	0.54	0.57	0.42a
		Mean	0.21	0.28	0.36	0.49	0.52	0.60	0.63	
RES	5 mg/kg	0 %	0.46	0.48	0.51	0.53	0.56	0.57	0.58	0.53c
		4 %	0.62	0.62	0.65	0.66	0.68	0.71	0.74	0.67b
		8 %	0.80	0.81	0.84	0.87	0.90	0.91	0.92	0.87a
		Mean	0.63	0.64	0.67	0.69	0.71	0.73	0.75	
	30 mg/kg	0 %	3.64	3.66	3.68	3.70	3.75	3.78	3.82	3.72b
		4 %	3.91	4.01	4.06	4.12	4.17	4.21	4.22	4.10a
		8 %	3.97	3.97	3.99	4.00	4.03	4.07	4.10	4.02a
		Mean	3.84	3.88	3.91	3.94	3.98	4.02	4.05	

[1] SOL(แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน), EXC (แคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้), Ca (แคดเมียมรูปคาร์บอเนต), Fe/Mn (แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส), OM (แคดเมียมรูปออร์แกนิก), RES (แคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด)

[2] รูปเคมีเดียวกันและความเข้มข้นของแคดเมียมเดียวกันตัวเลขในช่องสดมภ์เดียวกันที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (Least Significant Difference: LSD)

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 9 การเปลี่ยนแปลงเข้มข้นของแคดเมียมในรูปเคมีต่าง ๆ (mg/kg) ในดินร่วนหลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน (ข้อมูลตัวเลขในตารางเป็นค่าเฉลี่ย N=4)

ชนิดดิน/ รูปทางเคมี	อัตราการปนเปื้อน Cd	อัตราการใส่ยิปซัม	ระยะเวลาในการบ่มดิน (วัน)							ค่าเฉลี่ย[2]
			1	3	7	14	21	28	60	
Sandy Loam SOL[1]	5 mg/kg	0 %	1.31	1.23	1.16	1.12	1.08	1.08	1.06	1.15a
		4 %	1.43	1.36	1.32	1.24	1.18	1.15	1.11	1.26d
		8 %	1.41	1.34	1.27	1.17	1.11	1.10	1.08	1.21a
		Mean	1.38	1.31	1.25	1.18	1.13	1.11	1.08	
	30 mg/kg	0 %	11.68	11.52	11.32	11.27	11.16	11.05	10.94	11.28c
		4 %	11.78	11.73	11.64	11.51	11.37	11.20	11.05	11.47b
		8 %	12.21	12.08	11.83	11.72	11.48	11.28	11.24	11.69a
		Mean	11.89	11.78	11.60	11.50	11.34	11.18	11.08	
EXC	5 mg/kg	0 %	2.43	2.30	2.20	2.13	2.08	2.03	1.91	2.15a
		4 %	1.93	1.72	1.52	1.45	1.37	1.28	1.13	1.49b
		8 %	1.83	1.68	1.49	1.31	1.21	1.19	1.10	1.40b
		Mean	2.06	1.90	1.74	1.63	1.55	1.50	1.38	
	30 mg/kg	0 %	11.79	11.57	10.94	10.79	10.68	10.48	10.42	10.95a
		4 %	9.26	8.68	8.48	8.22	7.93	7.68	7.58	8.26b
		8 %	8.39	8.21	8.06	7.94	7.65	7.47	7.32	7.86c
		Mean	9.81	9.49	9.16	8.98	8.75	8.54	8.44	Mean
Ca	5 mg/kg	0 %	1.12	1.15	1.17	1.18	1.21	1.23	1.30	1.20b
		4 %	1.19	1.30	1.35	1.39	1.39	1.42	1.49	1.36a
		8 %	1.25	1.29	1.32	1.34	1.38	1.44	1.47	1.36a
		Mean	1.19	1.25	1.28	1.30	1.33	1.36	1.42	
	30 mg/kg	0 %	2.45	2.51	2.63	2.68	2.72	2.78	2.82	2.65c
		4 %	3.27	3.37	3.80	3.97	4.13	4.24	4.32	3.87a
		8 %	3.29	3.39	3.50	3.59	3.68	3.86	4.03	3.62b
		Mean	3.00	3.09	3.31	3.41	3.51	3.62	3.72	

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 9 (ต่อ)

ชนิดดิน/ รูปทางเคมี	อัตราการปนเปื้อน Cd	อัตราการใส่ยิปซัม	ระยะเวลาในการบ่มดิน (วัน)							ค่าเฉลี่ย[2]
			1	3	7	14	21	28	60	
Fe-Mn[1]										
	5 mg/kg	0 %	0.24	0.25	0.34	0.41	0.47	0.56	0.61	0.41a
		4 %	0.33	0.35	0.50	0.51	0.57	0.59	0.64	0.50a
		8 %	0.26	0.26	0.36	0.42	0.48	0.53	0.60	0.41a
		Mean	0.28	0.29	0.40	0.45	0.51	0.56	0.62	
	30 mg/kg	0 %	1.23	1.41	1.45	1.65	1.71	1.92	2.02	1.63b
		4 %	1.69	1.77	1.98	2.08	2.36	2.49	2.49	2.12a
		8 %	1.52	1.63	1.77	1.90	2.23	2.37	2.54	1.99a
		Mean	1.48	1.60	1.73	1.88	2.10	2.26	2.35	
OM										
	5 mg/kg	0 %	0.12	0.13	0.15	0.20	0.25	0.26	0.29	0.20b
		4 %	0.14	0.15	0.16	0.29	0.42	0.57	0.59	0.33a
		8 %	0.16	0.20	0.28	0.35	0.43	0.46	0.51	0.34a
		Mean	0.14	0.16	0.20	0.28	0.37	0.43	0.46	
	30 mg/kg	0 %	0.29	0.33	0.45	0.52	0.65	0.72	0.76	0.53a
		4 %	0.42	0.46	0.44	0.50	0.58	0.64	0.70	0.53a
		8 %	0.44	0.49	0.54	0.62	0.69	0.71	0.73	0.60a
		Mean	0.38	0.42	0.48	0.55	0.64	0.69	0.73	
RES										
	5 mg/kg	0 %	0.25	0.27	0.28	0.28	0.29	0.30	0.31	0.28b
		4 %	0.19	0.21	0.21	0.22	0.25	0.26	0.27	0.23b
		8 %	0.36	0.38	0.39	0.43	0.44	0.46	0.47	0.42a
		Mean	0.27	0.29	0.29	0.31	0.33	0.34	0.35	
	30 mg/kg	0 %	3.18	3.28	3.29	3.38	3.40	3.41	3.42	3.34c
		4 %	3.97	4.01	4.07	4.13	4.18	4.20	4.27	4.12b
		8 %	4.22	4.31	4.31	4.31	4.32	4.34	4.36	4.31a
		Mean	3.79	3.87	3.89	3.94	3.97	3.98	4.02	

[1] SOL(แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน), EXC (แคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้), Ca (แคดเมียมรูปคาร์บอเนต), Fe/Mn (แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส), OM (แคดเมียมรูปออร์แกนิก), RES (แคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด)

[2] รูปเคมีเดียวกันและความเข้มข้นของแคดเมียมเดียวกันตัวเลขในช่องสดมภ์เดียวกันที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (Least Significant Difference: LSD)

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ภาคผนวก ค

การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดินหลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28, และ 60 วัน

ตารางที่ 10 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดินหลังทดลอง

ชนิดดิน	อัตราการปนเปื้อนแคดเมียม	อัตราการใส่ยิปซัม	Time (Day)						
			1	3	7	14	21	28	60[1)]
Silty Clay	5 mg/kg	0 %	6.20	6.21	6.20	6.22	6.22	6.23	6.27c
		4 %	6.19	6.28	6.31	6.34	6.38	6.41	6.44b
		8 %	6.28	6.40	6.46	6.51	6.55	6.60	6.61a
	30 mg/kg	0 %	6.82	6.73	6.61	6.58	6.55	6.50	6.48b
		4 %	6.48	6.53	6.55	6.58	6.59	6.60	6.61ab
		8 %	6.71	6.74	6.81	6.84	6.85	6.87	6.89a
Loam	5 mg/kg	0 %	6.11	6.08	6.03	6.04	5.98	5.94	5.91b
		4 %	5.82	5.89	5.95	6.00	6.06	6.12	6.16b
		8 %	6.27	6.32	6.35	6.40	6.43	6.44	6.48a
	30 mg/kg	0 %	6.41	6.33	6.27	6.23	6.18	6.13	6.09c
		4 %	6.35	6.37	6.39	6.40	6.40	6.42	6.42b
		8 %	6.48	6.58	6.63	6.65	6.68	6.67	6.69a
Sandy Loam	5 mg/kg	0 %	6.73	6.79	6.67	6.62	6.56	6.53	6.49b
		4 %	6.49	6.55	6.61	6.64	6.69	6.69	6.71a
		8 %	6.66	6.72	6.76	6.79	6.83	6.85	6.84a
	30 mg/kg	0 %	6.93	6.88	6.86	6.69	6.61	6.58	6.52c
		4 %	6.67	6.72	6.75	6.78	6.82	6.83	6.84b
		8 %	6.91	6.92	6.95	6.95	6.97	6.98	6.98a

[1)] ณ วันที่ 60 ของการบ่มดินที่ชุดดินเดียวกันและความเข้มข้นเดียวกัน ตัวเลขในช่องสดมภ์เดียวกันที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (Least Significant Difference: LSD)

URU iThesis 5755266010 3 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ภาคผนวก ง

สัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีทั้ง 6 รูป ในดิน 3 ชนิด

ตารางที่ 11 สัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีทั้ง 6 รูป ในดินร่วนเหนียว หลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน

ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม	อัตราการใส่ยิปซัม	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	รูปทางเคมีของแคดเมียม (mg/kg)						สภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (%)	
			SOL	EXC	CA	Fe-Mn	OM	RES	พร้อมใช้	ไม่พร้อมใช้
5 mg/kg	0%	1	0.11	3.38	1.16	0.63	0.23	0.12	60.15	38.01
		3	0.10	3.28	1.17	0.69	0.32	0.27	56.36	42.02
		7	0.07	2.95	1.28	0.71	0.36	0.27	52.37	46.45
		14	0.06	2.83	1.39	0.74	0.39	0.34	49.28	49.74
		21	0.07	2.66	1.37	0.80	0.48	0.35	46.49	52.36
		28	0.06	2.49	1.38	0.90	0.51	0.35	43.82	55.18
		60	0.05	2.37	1.45	0.97	0.58	0.36	41.05	58.13
	4%	1	0.40	2.57	1.19	0.53	0.23	0.41	48.62	44.28
		3	0.36	2.48	1.20	0.54	0.24	0.47	47.24	46.31
		7	0.34	2.29	1.25	0.57	0.31	0.52	43.71	50.19
		14	0.30	2.23	1.31	0.62	0.43	0.53	41.44	53.32
		21	0.25	2.06	1.28	0.66	0.55	0.56	38.68	56.90
		28	0.22	1.81	1.34	0.67	0.63	0.58	34.70	61.33
		60	0.17	1.72	1.42	0.73	0.66	0.60	32.62	64.34
					1.20					
	8%	1	0.40	2.57	1.32	0.35	0.24	0.33	49.73	42.99
		3	0.36	2.62	1.38	0.37	0.30	0.36	48.97	44.71
		7	0.31	2.38	1.36	0.58	0.35	0.38	44.71	49.81
		14	0.27	2.17	1.45	0.63	0.41	0.42	40.83	54.39
		21	0.24	2.02	1.45	0.71	0.46	0.44	38.21	57.52
		28	0.22	1.91	1.47	0.71	0.47	0.46	36.67	59.35
		60	0.21	1.86	1.47	0.73	0.47	0.48	35.84	60.34

SOL=แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน EXC =แคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้)
Ca = แคดเมียมรูปคาร์บอเนต) Fe/Mn = แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส
OM = แคดเมียมรูปออร์แกนิก) RES = แคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด)

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 11 (ต่อ)

ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม	อัตราการใส่ยิปซัม	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	รูปทางเคมีของแคดเมียม (mg/kg)						สภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (%)	
			SOL	EXC	CA	Fe-Mn	OM	RES	พร้อมใช้	ไม่พร้อมใช้
30 mg/kg	0%	1	4.26	17.33	3.90	3.31	0.22	1.19	61.63	28.53
		3	4.22	16.94	4.08	3.40	0.26	1.29	60.33	29.91
		7	4.17	16.61	4.12	3.42	0.34	1.39	59.44	30.85
		14	4.15	16.13	4.26	3.54	0.46	1.46	57.92	32.40
		21	4.14	15.85	4.27	3.91	0.55	1.50	56.59	33.85
		28	4.13	15.55	4.26	4.01	0.64	1.52	55.77	34.64
		60	4.07	15.42	4.32	4.16	0.73	1.55	55.05	35.57
	4%	1	4.64	15.43	3.74	3.55	0.28	2.63	55.61	33.70
		3	4.53	14.83	4.35	3.69	0.32	2.78	53.15	36.52
		7	4.45	14.40	4.48	3.75	0.35	2.99	51.79	38.03
		14	4.20	13.19	5.15	3.66	0.53	3.12	48.39	41.74
		21	4.10	12.98	5.19	3.86	0.62	3.18	47.47	42.93
		28	4.01	12.67	5.25	4.05	0.70	3.25	46.34	44.27
		60	3.94	12.49	5.34	4.53	0.80	3.28	45.05	45.92
					1					
	8%	1	4.76	14.93	4.55	2.61	0.22	2.83	54.69	34.15
		3	4.61	14.79	4.68	2.72	0.24	2.86	54.07	35.12
		7	4.57	14.12	4.98	2.91	0.39	2.94	51.78	37.51
		14	4.51	13.42	5.35	2.99	0.54	2.93	49.63	39.71
		21	4.48	12.72	5.60	3.05	0.61	3.12	47.48	41.85
		28	4.47	12.40	5.70	3.24	0.64	3.20	46.29	43.10
		60	4.51	12.24	5.80	4.28	0.72	3.26	44.24	45.63

SOL=แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน EXC =แคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้)

Ca = แคดเมียมรูปคาร์บอเนต) Fe/Mn = แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส

OM = แคดเมียมรูปออร์แกนิก) RES = แคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด)

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 12 สัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีทั้ง 6 รูป ในดินร่วน หลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน

ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม	อัตราการใส่ยิปซัม	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	รูปทางเคมีของแคดเมียม (mg/kg)						สภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (%)	
			SOL	EXC	CA	Fe-Mn	OM	RES	พร้อมใช้	ไม่พร้อมใช้
5 mg/kg	0%	1	1.02	2.11	1.12	.045	0.12	0.46	64.21	35.79
		3	0.94	2.05	1.15	0.46	0.17	0.48	56.95	43.05
		7	0.92	1.80	1.17	0.57	0.24	0.51	52.21	47.79
		14	0.86	1.64	1.18	0.61	0.31	0.53	48.73	51.27
		21	0.81	1.48	1.21	0.66	0.46	0.56	44.21	55.79
		28	0.78	1.33	1.23	0.70	0.50	0.57	41.29	58.71
		60	0.72	1.19	1.30	0.73	0.52	0.58	37.90	62.10
	4%	1	1.33	1.84	1.19	0.54	0.12	0.62	56.21	43.79
		3	1.20	1.64	1.13	0.55	0.13	0.62	53.89	46.11
		7	1.04	1.84	1.35	0.63	0.23	0.65	50.17	49.83
		14	0.94	1.39	1.39	0.75	0.27	0.66	43.15	56.85
		21	0.93	1.32	1.39	0.78	0.42	0.68	40.76	59.24
		28	0.86	1.23	1.42	0.80	0.45	0.71	38.21	61.79
		60	0.81	1.10	1.49	0.81	0.46	0.74	35.30	64.70
	8%	1	1.32	1.87	1.25	0.45	0.13	0.80	54.81	45.19
		3	1.25	1.70	1.29	0.45	0.14	0.81	52.30	47.70
		7	0.96	1.56	1.32	0.63	0.21	0.84	45.65	54.35
		14	0.84	1.47	1.34	0.70	0.23	0.87	42.39	57.61
		21	0.74	1.32	1.38	0.75	0.30	0.90	38.22	61.78
		28	0.72	1.22	1.44	0.76	0.39	0.91	35.66	64.34
		60	0.70	1.06	1.47	0.80	0.44	0.92	32.65	67.35

SOL=แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน EXC =แคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้)

Ca = แคดเมียมรูปคาร์บอเนต) Fe/Mn = แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส

OM = แคดเมียมรูปออร์แกนิก) RES = แคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด)

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 12 (ต่อ)

ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม	อัตราการใส่ยิปซัม	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	รูปทางเคมีของแคดเมียม (mg/kg)						สภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (%)	
			SOL	EXC	CA	Fe-Mn	OM	RES	พร้อมใช้	ไม่พร้อมใช้
30 mg/kg	0%	1	10.29	11.83	1.45	2.07	0.21	3.64	75.01	24.99
		3	10.20	11.46	2.51	2.24	0.33	3.66	71.25	28.75
		7	10.17	10.81	2.63	2.41	0.34	3.68	69.84	30.16
		14	10.10	10.75	2.68	2.54	0.52	3.70	68.83	31.17
		21	10.08	10.48	2.72	2.64	0.60	3.75	67.92	32.08
		28	10.05	10.39	2.78	2.75	0.62	3.78	67.30	32.70
		60	10.03	10.06	2.82	2.86	0.65	3.82	66.44	33.56
	4%	1	11.61	9.63	3.27	2.29	0.18	3.91	68.76	31.24
		3	11.33	8.56	3.37	2.52	0.24	4.01	66.23	33.77
		7	11.03	8.69	3.80	2.91	0.36	4.06	63.92	36.08
		14	10.93	8.52	3.97	3.00	0.41	4.12	62.84	37.16
		21	10.86	8.33	4.13	3.04	0.56	4.17	61.72	38.28
		28	10.65	8.13	4.24	3.27	0.63	4.21	60.33	39.67
		60	10.59	8.12	4.32	3.33	0.68	4.22	59.85	40.15
	8%	1	110.8	10.08	3.29	2.16	0.24	3.97	68.66	31.34
		3	10.88	9.80	3.39	2.26	0.27	3.97	67.65	32.35
		7	10.08	9.14	3.50	2.57	0.39	3.99	64.78	35.22
		14	10.78	8.46	3.59	2.74	0.54	4.00	63.90	36.10
		21	10.66	8.20	3.68	2.88	0.39	4.03	63.20	36.80
		28	10.61	8.00	3.86	2.91	0.54	4.07	62.05	37.95
		60	10.55	7.86	4.03	3.04	0.57	4.10	61.06	38.94

SOL=แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน EXC =แคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้)

Ca = แคดเมียมรูปคาร์บอเนต) Fe/Mn = แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส

OM = แคดเมียมรูปออร์แกนิก) RES = แคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด)

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 13 สัดส่วนการกระจายตัวของแคดเมียมในรูปทางเคมีทั้ง 6 รูป ในดินร่วนทราย หลังจากบ่มดินนาน 1, 3, 7, 14, 21, 28 และ 60 วัน

ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม	อัตราการใส่ยิปซัม	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	รูปทางเคมีของแคดเมียม (mg/kg)						สภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (%)	
			SOL	EXC	CA	Fe-Mn	OM	RES	พร้อมใช้	ไม่พร้อมใช้
5 mg/kg	0%	1	1.31	2.43	1.12	0.24	0.12	0.25	68.37	31.63
		3	1.23	2.30	1.15	0.25	0.13	0.27	66.23	33.77
		7	1.16	2.20	1.17	0.34	0.15	0.28	63.40	36.60
		14	1.12	2.13	1.18	0.41	0.20	0.28	61.09	38.91
		21	1.08	2.08	1.21	0.45	0.25	0.29	58.96	41.04
		28	1.08	2.03	1.23	0.56	0.26	0.30	56.96	43.04
		60	1.06	1.91	1.30	0.61	0.29	0.31	54.20	45.80
	4%	1	1.43	1.93	1.19	0.35	0.14	0.19	64.24	35.76
		3	1.36	1.72	1.30	0.35	0.15	0.21	60.51	39.49
		7	1.32	1.52	1.35	0.50	0.16	0.21	56.13	43.87
		14	1.24	14.45	1.39	0.51	0.29	0.22	86.69	13.31
		21	1.18	1.37	1.39	0.57	0.42	0.25	49.23	50.77
		28	1.15	1.28	1.42	0.59	0.57	0.26	46.11	53.89
		60	1.11	1.13	1.49	0.64	0.59	0.27	42.83	57.17
	8%	1	1.41	1.83	1.25	0.26	0.16	0.36	61.48	38.52
		3	1.34	1.68	1.29	0.26	0.20	0.38	58.64	41.36
		7	1.27	1.49	1.32	0.36	0.28	0.39	54.01	45.99
		14	1.17	1.31	1.34	0.42	0.35	0.43	49.40	50.60
		21	1.13	1.21	1.38	0.48	0.43	0.44	46.15	53.85
		28	1.11	1.19	1.44	0.53	0.46	0.46	44.32	55.68
		60	1.08	1.10	1.47	0.60	0.51	0.47	68.37	31.63

SOL=แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน EXC =แคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้)

Ca = แคดเมียมรูปคาร์บอเนต) Fe/Mn = แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส

OM = แคดเมียมรูปออร์แกนิก) RES = แคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด)

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ตารางที่ 13 (ต่อ)

ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม	อัตราการใส่ยิปซัม	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	รูปทางเคมีของแคดเมียม (mg/kg)						สภาพพร้อมใช้ทางชีวภาพ (%)	
			SOL	EXC	CA	Fe-Mn	OM	RES	พร้อมใช้	ไม่พร้อมใช้
30 mg/kg	0%									
		1	11.68	11.79	2.45	1.23	0.29	3.18	76.65	23.35
		3	11.52	11.57	2.51	1.41	0.33	3.28	75.41	24.59
		7	11.32	10.94	2.63	1.45	0.45	3.29	74.00	26.00
		14	11.27	10.79	2.68	1.65	0.52	3.38	72.83	27.17
		21	11.16	10.68	2.72	1.71	0.65	3.40	72.03	27.97
		28	11.05	10.48	2.78	1.92	0.72	3.41	70.92	29.08
		60	10.94	10.42	2.82	2.02	0.76	3.42	70.31	29.69
	4%	1	11.78	9.26	3.27	1.69	0.42	3.97	69.23	30.77
		3	11.73	8.68	3.37	1.77	0.46	4.01	67.99	32.01
		7	11.64	8.48	3.80	1.98	0.44	4.07	66.16	33.84
		14	11.51	8.22	3.97	2.08	0.50	4.13	64.88	35.12
		21	11.37	7.93	4.13	2.36	0.58	4.18	63.18	36.82
		28	11.20	7.68	4.24	2.49	0.64	4.20	62.00	38.00
		60	11.05	7.58	4.32	2.49	0.70	4.27	61.26	38.74
	8%	1	12.21	8.39	3.29	1.52	0.44	4.22	68.51	31.49
		3	12.08	8.21	3.39	1.63	0.49	4.31	67.39	32.61
		7	11.83	8.06	3.50	1.77	0.54	4.31	66.28	33.72
		14	11.72	7.94	3.59	1.90	0.62	4.31	65.36	34.64
		21	11.48	7.65	3.68	2.23	0.69	4.32	63.66	36.34
		28	11.28	7.47	3.86	2.37	0.71	4.34	62.44	37.56

SOL=แคดเมียมรูปอิสระในสารละลายดิน EXC =แคดเมียมรูปที่แลกเปลี่ยนได้)

Ca = แคดเมียมรูปคาร์บอเนต) Fe/Mn = แคดเมียมรูปออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส

OM = แคดเมียมรูปออร์แกนิก) RES = แคดเมียมรูปที่เหลือจากการสกัด)

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47

ประวัติผู้วิจัย

URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47
3233077542

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล อภิสิทธิ์ นาสอน

วัน เดือน ปี เกิด 6 กุมภาพันธ์ 2560

สถานที่เกิด เลขที่ 50 หมู่ 4 ตำบลนาขุม อำเภอบ้านโคก จังหวัดอุตรดิตถ์

ที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 50 หมู่ที่ 4 ตำบลนาขุม อำเภอบ้านโคก จังหวัดอุตรดิตถ์

3233077542 URU iThesis 57552660103 thesis / recv: 04082562 21:10:49 / seq: 47