การใช้ผงกระดูกหมูยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินของข้าวสองสายพันธุ์

นางสาววรรณวิมล ธรรมมิกะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

USING SWINE BONE POWDER FOR INHIBITION OF CADMIUM UPTAKE IN CONTAMINATED SOIL OF TWO KINDS OF RICE

Miss Wanwimol Thammika

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ผงกระดูกหมูยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินของข้าวสองสายพันธุ์
โดย	นางสาววรรณวิมล ธรรมมิกะ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ตะวัน ลิมปิยากร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร พุทธวงษ์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วรรณวิมล ธรรมมิกะ : การใช้ผงกระดูกหมูยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินของข้าวสองสายพันธุ์ (USING SWINE BONE POWDER FOR INHIBITION OF CADMIUM UPTAKE IN CONTAMINATED SOIL OF TWO KINDS OF RICE)
อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์, 206 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการใช้ผงกระดูกหมูยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินของข้าวสองสายพันธุ์ โดยผลการศึกษา พบว่า ผงกระดูกหมูมีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ เมื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวในน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูงสุด 21.63 มิลลิกรัมต่อกรัม และเป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ ทำการปลูกข้าว 2 ชนิด คือข้าวขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L. var. Khao Dawk Mali 105) และข้าวเหนียว กข 6 (*Oryza sativa* L. cv. RD 6) ในกระถางที่มีการใส่สารประกอบ $Cd(NO_3)_2.4H_2O$ ที่ระดับความเข้มข้นแคดเมียม 0, 20, 40, 60, 80 และ100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ปริมาณผงกระดูกหมูที่ใส่ในดิน 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ผลการทดลอง พบว่า ข้าวทั้งสองสายพันธุ์เจริญเติบโตได้ดี แข็งแรง และออกรวงในทุกระดับความเข้มข้น การสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ พบว่า มีการสะสมในรากมากกว่าลำต้น และใบ ตามลำดับ ส่วนในเมล็ดข้าวและเปลือกข้าวไม่พบแคดเมียม ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ให้ผลผลิตมากกว่าข้าวเหนียว กข 6 เมื่อเปรียบเทียบการดูดดึงแคดเมียมในดินของข้าวทั้งสอง พบว่า ข้าวเหนียว กข 6 มีการดูดดึงแคดเมียมมากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียม (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 อยู่ในช่วง 4.44-8.79 % และ 2.91-7.12 % ส่วนข้าวเหนียว กข 6 อยู่ในช่วง 9.19-17.87 % และ 6.83-14.24 % ที่ชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ ดังนั้นปริมาณผงกระดูกหมูที่ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน จึงยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมได้สูงกว่าที่ 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และให้ผลผลิตข้าวได้มากกว่าอีกด้วย

ภาควิชา .....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต.....วรรณวิมล ธรรมมิกะ.....
สาขาวิชา .....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2552.....

5070603321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : SWINE BONE/ CADMIUM/ INHIBITION/ UPTAKE/ ORYZA SATIVA L.

WANWIMOL THAMMIKA : USING SWINE BONE POWDER FOR INHIBITION OF CADMIUM UPTAKE IN CONTAMINATED SOIL OF TWO KINDS OF RICE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. THARES SRISATIT, Ph.D., 206 pp.

The objective of this research was to study utilization of swine bone powder for inhibition of cadmium uptake in contaminated soil of two kinds of rice. Characteristic of swine bone powder was studied and found that the main component was calcium hydroxyl-apatite. Study the adsorption isotherm of cadmium ions (II) concentration in synthetic wastewater was 10 mg/l and contact time 72 hours. The results indicated the removal efficiency 21.63 mg/g and the adsorption isotherm was Langmuir model. Two kinds of rice: Khao Dawk Mali 105 (*Oryza sativa* L. var. Khao Dawk Mali 105) and RD 6 (*Oryza sativa* L. cv. RD 6) were cultivated by using treated soil with $Cd(NO_3)_2.4H_2O$ at the concentrations of 0, 20, 40, 60, 80 and 100 mg Cd/kg soil and swine bone powder of 5 and 10 g/kg soil, in experimental pots.

The results indicated that two kinds of rice could be grown well and could produce harvest under all conditions of cadmium concentration with healthy. The amounts of cadmium accumulation in various parts of rice found that the highest cadmium accumulation observed in the roots more than stems and leaves, respectively. Seeds and husk were non-detectable for cadmium. Khao Dawk Mali 105 rice could produce harvest more than RD 6 rice. The results of cadmium uptake in soil of two kinds of rice were compared. It was found that RD 6 rice could cadmium uptake more than Khao Dawk Mali 105 rice. The efficiency of cadmium uptake in Khao Dawk Mali 105 rice were in range 4.44-8.79 % and 2.91-7.12 % and RD 6 rice were in range 9.19-17.87 % and 6.83-14.24 % at the experiment pots were added swine bone powder of 5 and 10 g/kg soil, respectively. Thus, swine bone powder of 10 g/kg soil for inhibition of cadmium uptake in contaminated soil was more than 5 g/kg soil and more production.

Department : .....Environmental Engineering..... Student's Signature Wanwimol Thammika

Field of Study : ...Environmental Engineering..... Advisor's Signature .....

Academic Year : .....2009.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และตรวจสอบแก้ไข ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้ความเมตตาและอำนวยการสิ่งดีๆให้ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเธียร ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึง อาจารย์ ดร.ตะวัน ลิมปิยากร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร พุทธวงษ์ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้ข้อเสนอแนะ คำแนะนำ และช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยนี้ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการกำจัดขยะ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่สอนทักษะการทดลองที่ดี อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ตลอดจนภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ครูห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกต่างๆ

ขอขอบคุณ ดร.สุดารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการทำวิจัย รวมทั้งพี่ๆ น้องๆ เพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนการศึกษา ช่วยเหลือ ดูแลเอาใจใส่ และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดการทำวิทยานิพนธ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญรูป ..... ต
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 แคดเมียม 4
2.1.1 สมบัติของแคดเมียม 4
2.1.2 แหล่งกำเนิดแคดเมียม 4
2.1.3 การใช้ประโยชน์ของแคดเมียม 5
2.1.4 ความเป็นพิษของแคดเมียม 5
2.1.5 การเข้าสู่ร่างกายและกลไกการเกิดพิษ 5
2.1.6 ปฏิกิริยาในดิน 6
2.1.7 แคดเมียมในดิน 7
2.1.8 ความสัมพันธ์ของแคดเมียมและพืช 7
2.1.9 ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในดิน 8
2.2 ดิน 9
2.2.1 ชนิดและส่วนประกอบของดิน 9
2.2.2 คอลลอยด์ในดิน 11
2.2.3 สมบัติของดิน 14
2.2.3.1 สมบัติทางกายภาพ 14
2.2.3.2 สมบัติทางเคมี 17

หน้า

2.3 ข้าว (*Oryza sativa* L.)..... 20
2.3.1 ประวัติข้าวไทย..... 20
2.3.2 ลักษณะที่สำคัญของข้าว..... 21
2.3.3 ชนิดของข้าว..... 22
2.3.4 พันธุ์ข้าว..... 24
2.3.5 ลักษณะของข้าวที่สำคัญทางการเกษตร.....27
2.4 กระดูกหมู..... 28
2.4.1 ประวัติการเลี้ยงหมู (สุกร)..... 28
2.4.2 ประวัติการใช้กระดูกสัตว์..... 28
2.4.3 องค์ประกอบของกระดูกสัตว์.....29
2.4.4 โครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์..... 29
2.5 การบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)..... 31
2.5.1 คำจำกัดความของการบำบัดโดยใช้พืช.....31
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักโดยพืช.....32
2.6 การปนเปื้อนของแคดเมียมที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก..... 33
2.6.1 การศึกษาการปนเปื้อนแคดเมียม.....33
2.6.2 การดำเนินงานแก้ไขที่ผ่านมา.....34
2.7 การดูดติดผิว..... 36
2.7.1 กลไกการดูดติดผิว..... 37
2.7.2 ประเภทของการดูดติดผิว..... 38
2.7.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว..... 39
2.7.4 สมดุลของการดูดติดผิว..... 40
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 43
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... 48
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี..... 48
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์..... 48
3.1.2 สารเคมี..... 49
3.2 สถานที่ดำเนินงานวิจัย..... 49
3.3 ขั้นตอนงานวิจัย..... 50
3.3.1 การเตรียมกระดูกหมู..... 50
3.3.2 การเตรียมผงกระดูกหมู..... 50

หน้า

3.3.3 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของผงกระดูก..... 52
3.3.4 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของผงกระดูกหมู..... 52
3.3.5 การเตรียมดิน..... 57
3.3.6 การเตรียมเพาะกล้าพันธุ์ข้าว..... 58
3.3.7 สังเกตการเจริญเติบโตของพืช.....58
3.3.8 การวิเคราะห์ตัวอย่างพืชและดิน.....59
3.3.9 การวิเคราะห์ข้อมูล.....59
3.3.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ..... 60
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 61
4.1 ผลการเตรียมผงกระดูกหมู..... 61
4.2 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของผงกระดูกหมู..... 62
4.2.1 การวิเคราะห์ผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ……..... 62
4.2.2 การวิเคราะห์ผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller (BET)…….. 64
4.2.3 การวิเคราะห์ผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง Fourier Transforms Infrared Spectrometer (FTIR) ……..... 64
4.2.4 การวิเคราะห์ผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)……..... 65
4.3 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของผงกระดูกหมู……... 67
4.3.1 ผลการทดลองหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของผงกระดูกหมูในการกำจัดแคดเมียม..... 67
4.3.2 ผลการทดลองหาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมกับประสิทธิภาพการกำจัดของผงกระดูกหมู……..... 68
4.3.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมู…. 68
4.4 ศึกษาคุณสมบัติดินที่ใช้ในการทดลอง…….. 71
4.5 ศึกษาความเข้มข้นแคดเมียมของพันธุ์ข้าวก่อนการทดลอง……... 71
4.6 ศึกษาผลของความเข้มข้นแคดเมียมที่ระดับต่างกันที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าวสองสายพันธุ์……..... 72
4.6.1 การเจริญเติบโตของข้าวในระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน……... 72
4.6.2 ผลของความสูงกับระดับความเข้มข้นแคดเมียม.....73
4.6.3 การให้ผลผลิตของข้าวสองสายพันธุ์……... 75

หน้า

4.7 ศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวสองสายพันธุ์..... 77
4.7.1 ข้าวขาวดอกมะลิ 105..... 77
4.7.2 ข้าวเหนียว กข 6..... 79
4.7.3 เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของข้าวสองสายพันธุ์.... 81
4.8 เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมดและดินของข้าวสองสายพันธุ์กับปริมาณผงกระดูกหมู..... 81
4.8.1 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%)..... 81
4.8.2 ปริมาณแคดเมียมที่เหลือในดิน..... 85
4.8.3 สมดุลมวลของแคดเมียม 87
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 90
5.1 สรุปผลการทดลอง..... 90
5.1.1 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของผงกระดูกหมู..... 90
5.1.2 ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมู..... 90
5.1.3 ผลของความเข้มข้นแคดเมียมต่อการเจริญเติบโตของข้าวสองสายพันธุ์..... 90
5.1.4 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวสองสายพันธุ์..... 91
5.1.5 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมดของข้าวสองสายพันธุ์ (%)..... 91
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 92
รายการอ้างอิง..... 93
ภาคผนวก..... 99
ภาคผนวก ก วิธีคำนวณปริมาณแคดเมียมในดิน..... 100
ภาคผนวก ข ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมู..... 102
ภาคผนวก ค วิธีวิเคราะห์สมบัติดิน..... 114
ภาคผนวก ง รูปการทดลองปลูกข้าวสองสายพันธุ์ที่ระดับความเข้มข้นแคดเมียมต่างกันโดยใช้ปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัม และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 120
ภาคผนวก จ ข้อมูลความสูงของข้าวสองสายพันธุ์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ และข้อมูลการวิเคราะห์ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวสองสายพันธุ์ด้วยโปรแกรม SPSS : One-way anova ที่ระดับความเชื่อมั่น 99%..... 123
ภาคผนวก ฉ ข้อมูลผลผลิต (เมล็ด) ข้าวสองสายพันธุ์ และข้อมูลการวิเคราะห์ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวสองสายพันธุ์ ด้วยโปรแกรม SPSS : One-way anova ที่ระดับความเชื่อมั่น 99%..... 142

หน้า

ภาคผนวก ช ข้อมูลปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของข้าวสองสายพันธุ์ และข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS : One-way anova ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% 155
ภาคผนวก ซ ข้อมูลปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวสองสายพันธุ์ และข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS : One-way anova ที่ระดับความเชื่อมั่น99%..... 180
ภาคผนวก ฌ ข้อมูลปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวสองสายพันธุ์ และข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS : One-way anova ที่ระดับความเชื่อมั่น 99%..... 193
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 206

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของธาตุโลหะหนักในดิน ที่ยอมรับได้ในบางประเทศ	9
2.2	อัตราการแทรกซึมลงและความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน ที่ระดับความจุความชื้นปกติ	17
2.3	ค่าพีเอช (pH) ของดินที่เหมาะสมกับพืชบางชนิด	18
2.4	ค่าซีอีซีของดินไร่ในภาคต่างๆของประเทศไทย	19
2.5	จำนวนสุกรที่อนุญาตให้ฆ่าเป็นอาหารแสดงเป็นรายเดือนปี พ.ศ. 2550	30
3.1	วิธีวิเคราะห์สมบัติต่างๆของกระดูกหมู	52
3.2	สมบัติทางกายภาพและฟิสิกส์ของดิน	57
3.3	ปริมาณของแคดเมียม ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) ที่ใช้ในการทดลอง…….	58
4.1	พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรทั้งหมดของโพรงและขนาดโพรงของผงกระดูกหมู	64
4.2	เปรียบเทียบการเตรียมสารดูดซับที่สภาวะต่างกัน	64
4.3	ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมูแบบแลงมัวร์ และฟรุนดลิช	69
4.4	สมบัติต่างๆของดิน	71
4.5	ปริมาณแคดเมียมในพันธุ์ข้าวก่อนการทดลอง	71
4.6	ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105	73
4.7	ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวเหนียว กข 6	74
4.8	ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105	75
4.9	ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวเหนียว กข 6	76
4.10	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลอง ที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	78
4.11	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลอง ปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	78
4.12	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลอง ที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	79
4.13	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลอง ปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	80
4.14	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105	82
4.15	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวเหนียว กข 6	83

ตารางที่ หน้า

4.16 ปริมาณแคดเมียมที่เหลือในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 85
4.17 ปริมาณแคดเมียมที่เหลือในดินของข้าวเหนียว กข 6 86
4.18 สมดุลมวลของแคดเมียมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน .. 87
4.19 สมดุลมวลของแคดเมียมของข้าวเหนียว กข 6 ในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน 88
ข-1 ผลการทดลองกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วย ผงกระดูกหมู 0.02 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน 103
ข-2 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกหมู 0.02 กรัม 104
ข-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกหมู 0.02 กรัม 105
ข-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกหมู 0.02 กรัม 106
ข-5 ผลการทดลองกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกหมู 0.02 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัส 0.5-72 ชั่วโมง 107
ข-6 ผลการทดลองกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกหมู 0.05 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัส 0.5-72 ชั่วโมง 108
ข-7 ผลการทดลองกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกหมู 0.10 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัส 0.5-72 ชั่วโมง 109
ข-8 ผลการทดลองกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกหมู 0.50 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัส 0.5-72 ชั่วโมง 110
ข-9 ผลการทดลองกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกหมู 0.80 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัส 0.5-72 ชั่วโมง 111
ข-10 ผลการทดลองกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกหมู 1.20 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัส 0.5-72 ชั่วโมง 112
ข-11 ผลการทดลองไอโซเทอมการกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยผงกระดูกหมู ที่ระยะเวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง 113
จ-1 ความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน 124
จ-2 ความสูงของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน 130

ตารางที่ หน้า

จ-3 ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน…. 134
จ-4 ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน…… 135
จ-5 ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน…….. 136
จ-6 ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 137
จ-7 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 138
จ-8 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน…… 139
จ-9 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน…….. 140
จ-10 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน…….. 141
ฉ-1 ผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 143
ฉ-2 ผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 144
ฉ-3 ผลผลิตของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 145
ฉ-4 ผลผลิตของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน…….. 146
ฉ-5 ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน……147
ฉ-6 ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 148
ฉ-7 ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน……149

ตารางที่ หน้า

ฉ-8 ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน……..150

ฉ-9 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 151

ฉ-10 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 152

ฉ-11 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน……. 153

ฉ-12 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน……...154

ช-1 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 156

ช-2 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 157

ช-3 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 158

ช-4 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 159

ช-5 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน.... 160

ช-6 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 163

ช-7 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 166

ช-8 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 169

ช-9 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 172

ช-10 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 174

ตารางที่		หน้า
ช-11	เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวสองสายพันธุ์ที่ปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	176
ช-12	เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวสองสายพันธุ์ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	178
ซ-1	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	181
ซ-2	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	182
ซ-3	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	183
ซ-4	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	184
ซ-5	ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	185
ซ-6	ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	186
ซ-7	ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	187
ซ-8	ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	188
ซ-9	เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	189
ซ-10	เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	190

ตารางที่ หน้า

ซ-11 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวสองสายพันธุ์ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน……..... 191
ซ-12 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวสองสายพันธุ์ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 192
ฌ-1 ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน.....194
ฌ-2 ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน.....195
ฌ-3 ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน.....196
ฌ-4 ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน.....197
ฌ-5 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 198
ฌ-6 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 198
ฌ-7 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 200
ฌ-8 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 201
ฌ-9 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 202
ฌ-10 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 203
ฌ-11 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวสองสายพันธุ์ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 204
ฌ-12 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวสองสายพันธุ์ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 205

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบของดิน	10
2.2	แสดงโครงสร้างของซิลิกาเตตระฮีดรัล	13
2.3	แสดงโครงสร้างของอลูมินาออกตาฮีดรัล	13
2.4	ข้าว	20
2.5	ลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการขยายพันธุ์	22
2.6	ข้าวเหนียว กข 6	24
2.7	ข้าวขาวดอกมะลิ 105	26
2.8	โครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์	30
2.9	โครงสร้างของผลึกแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์	31
2.10	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดติดผิว	38
2.11	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich	41
2.12	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir	43
3.1	การเตรียมผงกระดูกหมู	51
3.2	การทดลองหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของผงกระดูกหมูในการกำจัดแคดเมียม	54
3.3	ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมกับประสิทธิภาพการกำจัดของกระดูกหมู	55
3.4	การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียม	56
4.1	กระดูกหมูที่ผ่านการเตรียมเบื้องต้น	61
4.2	ผงกระดูกหมูที่ใช้เป็นสารดูดซับ	62
4.3	ลักษณะพื้นผิวของผงกระดูกหมู กำลังขยาย 1,000 เท่า	63
4.4	ลักษณะพื้นผิวของผงกระดูกหมู กำลังขยาย 10,000 เท่า	63
4.5	องค์ประกอบทางเคมีของผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง FTIR	65
4.6	โครงสร้างผลึกของผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง XRD	66
4.7	ร้อยละการกำจัดแคดเมียมกับระยะเวลาสัมผัสของผงกระดูกหมู	67
4.8	ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมกับความเข้มข้นเริ่มต้นของผงกระดูกหมู	68
4.9	ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมกับปริมาณผงกระดูกหมูที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ	69
4.10	ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมูแบบแลงมัวร์	70
4.11	ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมูแบบฟรุนดลิช	70
4.12	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ทั้งหมด (%) กับปริมาณผงกระดูกหมู	83

รูปที่ หน้า

4.13 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในข้าวเหนียว กข 6 ทั้งหมด (%) กับปริมาณผงกระดูกหมู..... 84
4.14 สัดส่วนแคดเมียมของข้าวขาวดอกมะลิ 105..... 89
4.15 สัดส่วนแคดเมียมของข้าวเหนียว กข 6..... 89
ค-1 สามเหลี่ยมจำแนกเนื้อสัมผัสของดิน..... 119
ง-1 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เติมผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 121
ง-2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เติมผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 121
ง-3 ข้าวเหนียว กข 6 ที่เติมผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 122
ง-4 ข้าวเหนียว กข 6 ที่เติมผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน..... 122

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การปนเปื้อนของโลหะหนักในพื้นที่ทำเกษตร สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิต เนื่องจากโลหะหนักจะเกิดการสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต และถ่ายทอดไปสู่ระบบห่วงโซ่อาหารของมนุษย์และสัตว์

โลหะหนักในสิ่งแวดล้อมเกิดจากกระบวนการทางธรณีเคมีในธรรมชาติ (การสลายของหินอัคนี) และการกระทำของมนุษย์ เช่น โลหะที่เหลือการการทำเหมือง การหลอมโลหะในอุตสาหกรรม การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล การใช้สารฆ่าแมลงในการเกษตร ปุ๋ย และตะกอนสิ่งปฏิกูล (Alloway, 1995)

ในประเทศไทยพบว่ามีการปนเปื้อนของแคดเมียมและสังกะสีในดินและพืชในพื้นที่ปลูกข้าว บริเวณบ้านพะเด๊ะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก จากการสำรวจตัวอย่างดินและข้าวในพื้นที่ดังกล่าว พบว่าตัวอย่างดินบริเวณที่ได้รับน้ำชลประทานจากห้วยแม่ตาวที่ติดกับคลองส่งน้ำเข้าแปลงปลูกข้าวมีความเข้มข้นของแคดเมียมสูงเกินค่ามาตรฐานของสหภาพยุโรปที่กำหนดไว้ 3 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน และเมล็ดข้าวมีความเข้มข้นสูงกว่าค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ของสำนักงานอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา ซึ่งกำหนดไว้ที่ 0.2 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมข้าว โดยความเข้มข้นของสังกะสีและแคดเมียมมีค่าลดลงตามระยะที่ห่างจากคลองส่งน้ำ ปัญหาดินปนเปื้อนเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยและคุณภาพชีวิตของประชาชนในพื้นที่และบริเวณใกล้เคียง ผู้ที่ได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจะก่อให้เกิดโรค อิไต-อิไต คณะรัฐบาลไทยจึงได้จัดปัญหาดังกล่าวเข้าเป็นวาระแห่งชาติ พ.ศ.2547 เพื่อเร่งหาแนวทางแก้ไข (ประพิศ แสงทอง และพิชิต พงษ์สกุล, 2547)

การจัดการโลหะหนักที่สะสมในดินนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพ เช่น soil washing เป็นวิธีที่ใช้ตัวทำละลายในการล้างดินเพื่อแยกโลหะหนักออกจากเนื้อดิน วิธีทางเคมี เช่น stabilization ใช้หลักการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักไม่ให้เกิดการเคลื่อนย้ายสู่สิ่งแวดล้อม และวิธีทางชีวภาพ เช่น phytoremediation ใช้พืชในการบำบัดดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก มีค่าใช้จ่ายน้อย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ใช้เวลาในการบำบัดนาน (Faisal และคณะ, 2004)

ในการกำจัดโลหะหนักออกจากพื้นที่ปนเปื้อนโดยวิธีข้างต้นจะยุ่งยากซับซ้อน ถ้าสามารถกักเก็บโลหะหนักไว้ในดินแล้วทำการปลูกพืชได้ โดยการเติมสารยับยั้งการดูดดึงโลหะหนักสู่พืช เช่น ตัวดูดซับทางชีวภาพ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่หาง่าย ต้นทุนต่ำ น่าจะเป็นวิธีที่ดีกว่า

ตัวดูดซับทางชีวภาพที่สนใจในงานวิจัยนี้ คือ กระดูกหมู จากข้อมูล ฝ่ายประมวลผลและสถิติ กองแผนงาน กรมปศุสัตว์ ข้อมูลจำนวนสุกรที่อนุญาตให้ฆ่าเป็นอาหารเป็นรายเดือนปี พ.ศ. 2550 จะมีจำนวนที่ถูกฆ่า 5,929,032 ตัวต่อปี จะมีปริมาณกระดูกหมูประมาณ 10,000 - 13,000 ตันต่อปี

งานวิจัยนี้จะศึกษาดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมที่ปลูกข้าวสองสายพันธุ์ คือ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L. var. Khao Dawk Mali 105) และข้าวเหนียว กข 6 (*Oryza sativa* L. cv. RD 6) ศึกษาและเปรียบเทียบความเป็นไปได้ของการยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมในข้าวสองสายพันธุ์โดยการใช้ผงกระดูกหมู ศึกษาการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของพันธุ์ข้าว ศึกษาผลของความเข้มข้นแคดเมียมที่ระดับต่างกันที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพันธุ์ข้าว ซึ่งถ้าหากการลดการสะสมแคดเมียมในข้าวมีประสิทธิภาพมากพอ จะเป็นแนวทางที่นำไปใช้ในพื้นที่ปลูกข้าวบริเวณพะเด๊ะได้ ทำให้ข้าวมีปริมาณแคดเมียมลดลง ไม่เกิดอันตรายต่อประชาชน และสามารถทำได้ง่ายโดยใช้ผงกระดูกหมู

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวสองสายพันธุ์ ได้แก่ ราก ลำต้น ใบเปลือก และเมล็ด

1.2.2 ศึกษาการยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมในข้าวสองสายพันธุ์ โดยการใช้ผงกระดูกหมูผสมลงไปในดินที่สัดส่วนแตกต่างกัน

1.2.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นแคดเมียมที่ระดับต่างกันที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าวสองสายพันธุ์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ข้าวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L. var. Khao Dawk Mali 105) และข้าวเหนียว กข 6 (*Oryza sativa* L. cv. RD 6) และใช้ดินในบริเวณบ่อตาโล่ อำเภอวังน้อย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

1.4.2 ปลูกพืชโดยใช้ผสมกับ $Cd(NO_3)_2.4H_2O$ ที่ความเข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80 และ100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมของดิน

1.4.3 สารยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมในข้าว คือ ผงกระดูกหมูที่ผ่านการต้มแล้ว

1.4.4 ใช้ปุ๋ยสูตร 15-15-15

1.4.5 ข้าวทั้งสองชนิดเจริญเติบโตภายใต้แสงและอุณหภูมิในธรรมชาติ จนกระทั่งถึงเวลาเก็บเกี่ยวจึงนำมาวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่สะสมในราก ลำต้น ใบ เปลือกและเมล็ด

1.4.6 วางแผนการทดลองแบบ CRD (Completely Randomize Design) และวิเคราะห์ความแตกต่างของการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวสองสายพันธุ์ ในระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน โดยใช้โปรแกรม SPSS : One-way ANOVA

1.4.7 ทำการทดลองที่หน่วยวิจัยการจัดการกากอุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการกำจัดขยะ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียม ณ พื้นที่จริงได้ เช่น พื้นที่ปลูกข้าวบริเวณบ้านพะเด๊ะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

1.5.2 สามารถพัฒนาผงกระดูกหมูเพื่อนำไปใช้ในการลดปริมาณแคดเมียมที่สะสมในข้าว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แคดเมียม (Cadmium)

2.1.1 สมบัติของแคดเมียม

แคดเมียมเป็นโลหะกรุ๊ป 2B ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 48 น้ำหนักอะตอม 112.4 มีวาเลนซี 2 มีไอโซโทปที่เสถียร 8 ไอโซโทป แคดเมียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวสามารถตีเป็นแผ่นได้ ที่เป็นผงมีลักษณะสีเทาอ่อน เงาวาวหรือสีฟ้าอ่อน เมื่อถูกความชื้นในอากาศจะหมองและผุกร่อนได้ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะเปราะ มีความทนต่อด่าง ความถ่วงจำเพาะ 8.642 จุดหลอมเหลว 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด 767 องศาเซลเซียส ค่าดัชนีหักเห 1.13 ความแข็ง (Mohs hardness) 2.0 ละลายในกรดโดยเฉพาะกรดไนตริก และละลายได้ในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรท (Hawley, 1983) แคดเมียมมีรัศมีของไอออนในผลึก (ionic radius in crystals) อยู่ในช่วง 0.78-1.31 อังสตรอม (David, 2004)

2.1.2 แหล่งกำเนิดแคดเมียม

ในธรรมชาติแคดเมียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแคดเมียมซัลไฟด์ มักพบแคดเมียมร่วมกับแร่สังกะสี ดังนั้น ผลิตผลพลอยได้จากการถลุงสินแร่สังกะสี คือ แคดเมียม แหล่งการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินมาจาก 3 แหล่งใหญ่ ได้แก่ 1) เหมืองแร่สังกะสีและตะกั่ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนการถลุงแร่ 2) กากตะกอนน้ำโสโครก เช่น น้ำเสียหรือกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรม โดยกลุ่มสหภาพยุโรป (EU) และประเทศอิตาลีกำหนดความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ของแคดเมียมในกากตะกอนน้ำเสียที่จะมาใช้ในการเกษตร มีค่าเท่ากับ 1-3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) และ 1.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ (Moolenarr และ Beltrami, 1998) และ 3) ปุ๋ย เช่น ปุ๋ยฟอสเฟต และปุ๋ยคอก ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินปกติมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-0.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (2540) รายงานว่า บริเวณและพื้นที่ใกล้แหล่งเหมืองแร่สังกะสีโดยทั่วไป มักพบการปนเปื้อนแคดเมียมร่วมกับสังกะสีในอัตราส่วนระหว่างแคดเมียมต่อสังกะสีประมาณ 1:1,000 และบริเวณรอบเหมืองแร่สังกะสีในรัศมี 1 กิโลเมตร มีการปนเปื้อนแคดเมียมในปริมาณสูงถึง 1,750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นิตยา ตันมณี และ จุไร ทองมาก (2537) ศึกษาดินในพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการปนเปื้อนแคดเมียมบางแห่งในประเทศไทย เช่น บริเวณ

พื้นที่ที่ทำการเกษตรใกล้กับโรงงานถลุงแร่สังกะสี และพื้นที่ที่เคยได้รับน้ำเสียและกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานในจังหวัดตาก พบว่า ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดของตัวอย่างดินที่เก็บในพื้นที่ที่ห่างจากโรงงานถลุงแร่สังกะสีประมาณ 1.5 กิโลเมตร มีปริมาณแคดเมียมเฉลี่ย 1.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และตัวอย่างดินในพื้นที่ที่ได้รับน้ำเสียและกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานพบปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยสูงสุด 51.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2.1.3 การใช้ประโยชน์ของแคดเมียม

แคดเมียมถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น ใช้เคลือบผิวหรือชุบโลหะ (electroplating) ใช้เป็นตัวทำให้เกิดสี ทำแบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม การผลิตเซมิคอนดักเตอร์ การผลิตพลาสติก โรงงานโลหะผสม เป็นต้น

2.1.4 ความเป็นพิษของแคดเมียม

แคดเมียมเป็นสารพิษมีอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ เนื่องจากแคดเมียมสามารถสะสมพิษในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านการรับประทานและการหายใจเอาฝุ่นละอองหรือไอโลหะเข้าไป ก่อให้เกิดการสะสมแคดเมียมในไตและตับ แสดงความเป็นพิษเรื้อรังต่ออวัยวะภายในร่างกาย เช่น ปอด ระบบเลือด กระดูกพรุนและโรคอิไตอิไต เป็นต้น ค่าความเป็นพิษอย่างเฉียบพลันอยู่ในปริมาณ 350-3,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมทำให้ถึงขั้นชีวิตได้ สำหรับสัตว์ที่ได้รับแคดเมียมประมาณ 1,300 ไมโครกรัมต่อวันจะเกิดโรคโลหิตจาง ความดันโลหิตสูง อัตราการเจริญเติบโตช้าและมีอายุสั้น (ยุพดี เสตพรรณ, 2544)

2.1.5 การเข้าสู่ร่างกายและกลไกการเกิดพิษ (เกศิณี พกุลานนท์, 2547)

การเข้าสู่ร่างกายและกลไกการเกิดพิษเนื่องจากแคดเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้สองทาง คือ ทางการกินและการหายใจ เมื่อคนกินเข้าไป แคดเมียมมักถูกดูดซึมในระบบทางเดินอาหาร ประมาณร้อยละ 6 แต่ในภาวะที่ร่างกายขาดแร่ธาตุเหล็กทำให้เกิดการดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้สูงขึ้นถึงร้อยละ 20 ของจำนวนแคดเมียมที่เข้าสู่ร่างกาย และส่วนทางการหายใจรับฝุ่นหรือไอควันแคดเมียมในบรรยากาศการทำงานได้ทางปอดประมาณร้อยละ 20-50 ภายหลังจากการดูดซึมเข้าสู่ร่างกายแล้ว แคดเมียมถูกลำเลียงต่อไปยังตับและจับตัวรวมกับโปรตีนประมาณร้อยละ 80-90 ของจำนวนแคดเมียมทั้งหมด และประมาณร้อยละ 50 ของแคดเมียมที่มีอยู่ทั้งหมดในร่างกาย สะสมอยู่ในตับและไต

แคดเมียมมีระยะครึ่งอายุยาวถึงประมาณ 7-30 ปี ตามปกติแคดเมียมถูกขับออกจากร่างกายทางปัสสาวะ ในรูปของสารเชิงซ้อนแคดเมียม-เมตัลโลธัยโอริง อัตราการขับออกทางปัสสาวะค่อนข้างต่ำ และจำนวนเล็กน้อยถูกขับออกมาทางถุงน้ำดี น้ำลาย ผม และเล็บ

พิษเรื้อรังจากแคดเมียมอาจเป็นพิษเฉพาะที่ ได้แก่ ผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ การทำลายไต การมีโปรตีนในปัสสาวะ และการเกิดโรคโลหิตจาง เป็นต้น

การได้รับแคดเมียมเป็นเวลานานมักพบลักษณะของกระดูกผิดปกติ ได้แก่ กระดูกโพรก กระดูกพรุน และกระดูกหักง่าย ทำให้ผู้ป่วยมีอาการปวดกระดูกขาและเดินลำบาก ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นผลของแคดเมียมต่อเมทาบอลิซึมของกระดูกโดยตรง และแคดเมียมยังก่อให้เกิดการแตกทำลายของเม็ดเลือดแดงเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดการขาดธาตุเหล็ก ทำให้เกิดอาการซีดชนิด hypochromic ซึ่งเป็นชนิดที่พบบ่อยในผู้ที่ได้รับแคดเมียมเข้าไปในระดับสูง

แคดเมียมได้รับการจัดว่าเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง เมื่อได้รับแคดเมียมทำให้เกิดมะเร็งในต่อมลูกหมากเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้มีรายงานการศึกษาจากหลายฉบับที่แสดงถึงแนวโน้มว่าแคดเมียมเป็นสารก่อมะเร็ง โดยมีการทดลองให้ CdS_2 และ $CdSO_4$ ใต้ผิวหนังและกล้ามเนื้อสัตว์ทดลอง พบว่าก่อให้เกิดมะเร็งชนิด sarcoma ณ บริเวณนั้น และสามารถแพร่ไปยังต่อมน้ำเหลืองและปอดได้

2.1.6 ปฏิกิริยาในดิน (สุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2538)

แคดเมียมในหินอัคนีและหินตะกอนจะมีปริมาณไม่เกิน 0.3 ppm และจะพบอยู่รวมกับสังกะสีเสมอแต่ในสภาพดินที่เป็นกรดแคดเมียมมีสภาพเคลื่อนที่ดีกว่าสังกะสี ในการสลายตัวของหินและแร่ แคดเมียมในดินอยู่ในสภาพละลายได้ง่ายโดยจะอยู่ในรูป Cd^{2+} เป็นส่วนใหญ่ โดยอาจจะอยู่ในรูปของไอออนเชิงซ้อน (Complex ion) และสารประกอบได้ดังนี้

แคตไอออน : $CdCl^+$, $CdOH^+$, $CdHCO_3^+$

แอนไอออน : $CdCl_3^-$, $CdCl_4^{2-}$, $Cd(OH)_3^-$, $Cd(OH)_4^{2-}$

สารประกอบ : CdO , $CdCO_3$

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการควบคุมสภาพเคลื่อนที่ได้ของแคดเมียมในดิน คือ พีเอช และศักย์รีดอกซ์ ซึ่งดินที่มีศักย์รีดอกซ์สูง แคดเมียมจะอยู่ในรูปสารประกอบเช่น CdO หรือ $CdCO_3$ หรืออาจอยู่รวมกับฟอสเฟตได้เช่นเดียวกัน

แคดเมียมเคลื่อนที่ได้ในดินที่มีค่าพีเอชระหว่าง 4.5 ถึง 5.5 ขณะที่ในดินที่เป็นด่างแคดเมียมไม่ค่อยเคลื่อนที่ ซึ่งในสภาพดินเป็นกรดสภาพละลายได้ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม และปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

แคดเมียมในดินจะเปลี่ยนจากรูปสารประกอบอินทรีย์ไปอยู่ในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนได้มากขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงศักย์รีดอกซ์และพีเอชในดินมีผลต่อการละลายได้และการแพร่กระจายของแคดเมียมเป็นอย่างมาก

ปริมาณแคดเมียมในดินทั่วไปมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.07 - 1.0 ppm โดยมีค่าเฉลี่ยสูงในดินฮิสโตซอลส์และค่าเฉลี่ยโดยรวมของดินทั่วไปมีค่า 0.53 ppm สำหรับดินที่มีการปนเปื้อน แหล่งปนเปื้อนที่สำคัญ คือ การถลุงแร่ กากตะกอนน้ำโสโครก ปริมาณแคดเมียมในพืชทั่วไปมีค่าต่ำ จะมีค่าสูงในพืชบางชนิด เช่น ผักกาดหอม 0.66 ppm หรือในใบผักโขม (spinach) ในปริมาณ 0.11 ppm (น้ำหนักสด) เพื่อกินใบ หรือพืชหัวบางชนิด จึงเป็นตัวนำแคดเมียมสู่มนุษย์ เมื่อมีการปนเปื้อน แคดเมียมจะสะสมในรากมากที่สุด โดยสะสมในใบรองลงมา และมีการเคลื่อนย้ายสู่เมล็ดได้น้อย (สุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2538)

2.1.7 แคดเมียมในดิน

แคดเมียมเมื่ออยู่ในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพที่แลกเปลี่ยนได้ทำให้ศักยภาพในการเคลื่อนที่และการแพร่กระจายของแคดเมียมสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะหนักตัวอื่น ๆ พบว่าความสามารถในการเคลื่อนที่เรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ Cd > Zn > Cu, Ni แคดเมียมเมื่ออยู่ในรูปตะกอนที่เป็นด่าง เช่น Cd-sludge มีแนวโน้มที่จะอยู่ในลักษณะคีเลตหรือรวมกับอินทรีย์สารที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble organic bound) เป็นส่วนใหญ่ และปริมาณในส่วนนี้จะไม่ถูกกระทบโดยการเปลี่ยนแปลงสภาพออกซิเดชัน-รีดักชันแต่อย่างไร เมื่อมีสภาพความเป็นกรดเพิ่มขึ้นและอากาศถ่ายเทดี แคดเมียมในดินจะเปลี่ยนรูปจากสารประกอบอินทรีย์ไปอยู่ในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนได้มากขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพีเอชและศักย์รีดอกซ์ในดินมีผลต่อการละลายได้ และการแพร่กระจายของแคดเมียมเป็นอย่างมาก (เกศิณี พกุลานนท์, 2547)

2.1.8 ความสัมพันธ์ของแคดเมียมและพืช

แคดเมียมสามารถละลายได้ดีในดิน ดังนั้นแม้แคดเมียมมีเพียงปริมาณเล็กน้อยปนเปื้อนในดินจะถูกดูดและสะสมในพืชซึ่งโดยสภาพความเข้มข้นปกติ พืชจะมีแคดเมียมในมวลแห้งน้อยกว่า 1 ppm. ถึงแม้จะมีแคดเมียมในพืชสูงมากพืชก็จะปราศจากอาการเป็นพิษจากแคดเมียม ซึ่งนับว่าเป็นอันตรายอย่างมากเนื่องจากพืชเป็นผู้ผลิตในห่วงโซ่อาหาร ในดินทั่วไปมีแคดเมียมอยู่ 0.5 ppm. องค์กรป้องกันสิ่งแวดล้อม EPA กำหนดปริมาณแคดเมียมที่สามารถบริโภคได้ 30 ไมโครกรัมต่อวัน (เกศิณี พกุลานนท์, 2547)

ระดับความเป็นพิษขั้นวิกฤตของแคดเมียมในส่วนที่อยู่เหนือดินของพืชทั่วไป มีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 5-700 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) ในดินที่มีแคดเมียมสูงจนถึงขั้นเป็นพิษต่อพืช พืชจะเริ่มแสดงอาการที่ใบอ่อน โดยเนื้อเยื่อระหว่างเส้นใบมีสีเหลืองซีด ปลายใบม้วน ต้นแคระแกร็น (John, 1978) ความรุนแรงของอาการเป็นพิษขึ้นอยู่กับชนิดและความทนทานของพืชชนิดนั้น

2.1.9 ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในดิน

ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในดินที่ยอมรับได้ (maximum permitted concentration) คือ ค่ากำหนดมาตรฐานความปลอดภัยของโลหะหนักที่อนุญาตให้มีปริมาณสูงสุด ทั้งในดินและวัตถุที่ใช้เพื่อปรับปรุงดินในการเกษตรรวมทั้งปริมาณสะสมหรือตกค้างที่พบในดิน หลังการใช้วัตถุดังกล่าว ในบางประเทศที่พัฒนาแล้วหลายประเทศ เช่น สมาชิกสหภาพยุโรป เยอรมัน ออสเตรเลีย อังกฤษ แคนาดา สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น มีค่ากำหนดระดับมาตรฐานของโลหะหนักในดินของแต่ละประเทศแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1

พิชิต พงษ์สกุล (2545) และสุรสิทธิ์ อรรถจารุสิทธิ์ (2542) ได้ทำการประเมินและกำหนดระดับเกณฑ์พื้นฐาน(background levels หรือ ระดับตรวจสอบ (investigation levels) ของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทย ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่นำมาใช้การประเมินการปนเปื้อนระยะแรก บ่งชี้ถึงอันตรายที่เกิดในระดับความเข้มข้นที่ทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดมลพิษในสภาพแวดล้อมและเป็นอันตรายต่อมนุษย์ โดยสำรวจและเก็บตัวอย่างดินชั้นบนในพื้นที่ทำการเกษตรและแปลงทดลองปุ๋ยระยะยาวในทุกภาคของประเทศไทย จำนวน 318 ตัวอย่าง กำหนดโดยค่าความเข้มข้นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ไทล์ เป็นระดับเกณฑ์พื้นฐานความเข้มข้นของสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว ในดินของประเทศไทย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 70, 0.15 และ 55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของธาตุโลหะหนักในดินที่ยอมรับได้ในบางประเทศ (ปรีดา พากเพียร และคณะ, 2541) และ (ทัศนีย์ อัตตะนันทน์, 2543)

ประเทศ	ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของธาตุโลหะหนักในดินที่ยอบรับได้ในบางประเทศ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	สังกะสี	แคดเมียม	ตะกั่ว
กลุ่มสหภาพยุโรป (EU)	300	3	100
อังกฤษ	280	1-3	35
เยอรมัน	300	3	50
ฮอลแลนด์	200-500	1-5	50-150
ญี่ปุ่น	150	–	400

2.2 ดิน (Soil)

2.2.1 ชนิดและส่วนประกอบของดิน

ดิน หมายถึง วัตถุทางธรรมชาติที่ปกคลุมผิวโลก เกิดจากการแปลงสภาพหรือสลายตัวของหิน แร่ธาตุและอินทรียวัตถุผสมคลุกเคล้ากันตามธรรมชาติรวมตัวกันเป็นชั้นบาง ๆ เมื่อมีน้ำและอากาศที่เหมาะสมก็จะทำให้พืชเจริญเติบโตและยังชีพอยู่ได้ (สุธิลา ตุลยะเสถียร และคณะ, 2544)

ชนิดของดินสามารถจำแนกตามลักษณะของเนื้อดินออกเป็น 3 ประเภท ดังต่อไปนี้

1) ดินเหนียว คือ ดินที่มีเนื้อละเอียดที่สุด ยึดหยุ่นเมื่อเปียกน้ำ เหนียวติดมือ ปั้นเป็นก้อนหรือคลึงเป็นเส้นยาวได้ พังทลายได้ยาก อุ้มน้ำได้ดี จับยึดและแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชได้ค่อนข้างสูงจึงมีธาตุอาหารอยู่มากเหมาะที่จะใช้ปลูกข้าวนาดำเพราะเก็บน้ำได้นาน

2) ดินทราย คือ ดินที่เกาะตัวกันไม่แน่น ระบายน้ำและอากาศได้ดีมาก อุ้มน้ำได้น้อย พังทลายง่าย มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำเพราะความสามารถในการจับยึดธาตุอาหารมีน้อย พืชที่ขึ้นอยู่ในบริเวณดินทรายจึงขาดน้ำและธาตุอาหารได้ง่าย

3) ดินร่วน คือ ดินที่มีเนื้อค่อนข้างละเอียด นุ่มมือ ยึดหยุ่นพอสมควร ระบายน้ำได้ดีปานกลาง มีแร่ธาตุอาหารพืชมากกว่าดินทราย เหมาะสำหรับใช้ในการเพาะปลูก ซึ่งไม่ค่อยพบใน

ธรรมชาติ แต่จะพบเนื้อดินที่มีลักษณะใกล้เคียงเป็นส่วนมาก

ส่วนประกอบของดินสามารถจำแนกได้เป็น 4 ส่วน (รูปที่ 2.1) คือ

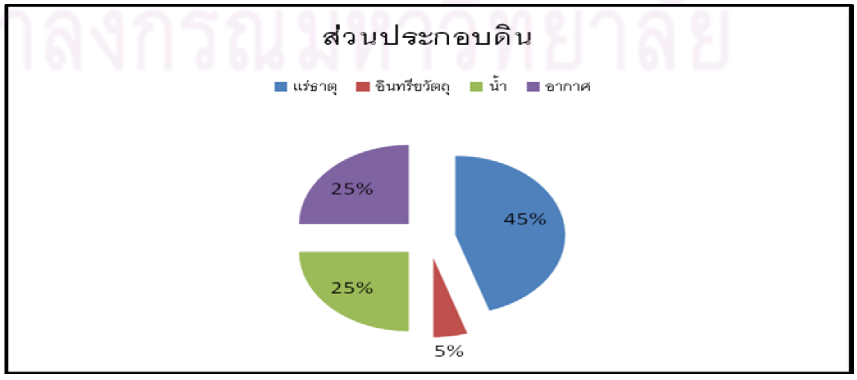
1) อนินทรียวัตถุหรือแร่ธาตุ เป็นส่วนที่สลายตัวมาจากวัตถุให้กำเนิดดิน เช่น หิน หรือแร่ โดยทั่วไปจะพบในดินในสัดส่วนประมาณครึ่งหนึ่งของเนื้อดินทั้งหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแต่ละพื้นที่ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

2) อินทรียวัตถุ เป็นส่วนที่มีหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดของธาตุอาหารของพืชที่เกิดจากการเน่าเปื่อยของซากพืชและสัตว์ที่ทับถมกันอยู่บนดินโดยจุลินทรีย์ อินทรียวัตถุที่ย่อยสลายแล้วและอยู่ในสภาพที่เหมาะสมเรียกว่า ฮิวมัส (humus) อินทรียวัตถุเป็นส่วนประกอบที่บอกตัวความอุดมสมบูรณ์ของดิน เพราะนอกจากเป็นสารอาหารของพืชแล้ว ยังทำให้เกิดสภาพกรดอ่อนที่เหมาะสมต่อการละลายของแร่ธาตุในดินที่เป็นธาตุอาหารสำหรับพืชอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีสมบัติในการรักษาความชื้นไว้ในดิน (สุธิลา ตุลยะเสถียร และคณะ, 2544)

3) น้ำ เป็นส่วนประกอบที่พบอยู่รอบ ๆ อนุภาคดินและในช่องว่างระหว่างอนุภาคของดิน (pore space) น้ำในดินมีความสำคัญคือ เป็นแหล่งน้ำสำหรับพืชและจุลินทรีย์ในดิน นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายธาตุอาหารต่าง ๆในดินซึ่งช่วยให้พืชสามารถนำไปใช้ได้

4) อากาศ ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน และออกซิเจน ซึ่งจะแทรกอยู่ตามที่ว่างในดินระหว่างอนุภาคดิน ก๊าซแต่ละชนิดมีความสำคัญต่างกันไป ดังนี้คือ ออกซิเจนเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในการหายใจของพืชและจุลินทรีย์ ก๊าซไนโตรเจนในอากาศจะถูกเปลี่ยนเป็นเกลือไนเตรทซึ่งเป็นธาตุอาหารพืชโดยแบคทีเรียที่สามารถตรึงไนโตรเจน (Nitrogen fixing bacteria) เช่น แบคทีเรียในสกุล Rhizobium ที่อาศัยอยู่ในปมรากพืชตระกูลถั่ว เป็นต้น (สุธิลา ตุลยะเสถียร และคณะ, 2544)

สัดส่วนดินที่ถือว่ามีส่วนประกอบที่เหมาะสมแก่การเพาะปลูกพืช โดยทั่วไปมักจะมีส่วนประกอบ ประกอบด้วยอนินทรีย์ (แร่ธาตุ) ร้อยละ 45 อินทรีย์วัตถุร้อยละ 5 อากาศร้อยละ 25 และน้ำร้อยละ 25 (สุธิลา ตุลยะเสถียร และคณะ, 2544; คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของดิน

2.2.2 คอลลอยด์ในดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ดินที่อยู่ในสารละลายประกอบด้วยแร่ธาตุต่าง ๆ อินทรียวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก และสามารถแขวนลอย ซึ่งมีอนุภาคเล็กประมาณ 0.2 - 0.5 ไมครอน สารคอลลอยด์ในดิน แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ คอลลอยด์ที่เป็นสารอินทรีย์ (organic colloid) คอลลอยด์ประเภทนี้ คือ ส่วนที่หลงเหลือจากเศษซากพืชซากสัตว์ที่ถูกย่อยสลายแล้ว ส่วนนี้จะทนทานต่อการสลายตัวหรือสลายตัวได้ช้ามาก เรียกสารอินทรีย์ส่วนนี้ว่า ฮิวมัส (humus) คอลลอยด์ที่เป็นสารอนินทรีย์ (inorganic colloid) คอลลอยด์ประเภทนี้ คือ ส่วนที่ได้จากการสลายตัวของแร่ธาตุ ซึ่งจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของไอออนและอนุมูลต่าง ๆ และส่วนที่ปลดปล่อยออกมานี้อาจตกผลึกหรือทำปฏิกิริยารวมตัวกันใหม่ เป็นผลึกบาง ๆ มีขนาดเล็กมาก เรียกว่า แร่ดินเหนียว (clay mineral) แร่ดินเหนียวแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัม และซิลิเกตเคลย์ หรืออะลูมิโนซิลิเกต

1) สมบัติที่สำคัญของซิลิเกตเคลย์ (Silicate clay)

ซิลิเกตเคลย์หรืออะลูมิโนซิลิเกตเป็นคอลลอยด์ที่มีอยู่ในดินมากที่สุดในโครงสร้างของแร่ดินเหนียว มีสมบัติที่สำคัญดังต่อไปนี้

1.1) ลักษณะของซิลิเกตเคลย์ เป็นแผ่นบาง ๆ ซ้อนกันอยู่เป็นจำนวนมาก อนุภาคของแร่ดินเหนียวส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นผลึกบาง ๆ มีรูปร่างเป็นหกเหลี่ยม (hexagonal) ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope) ส่วนแร่ดินเหนียวบางชนิดมีรูปร่างเป็นม้วนก็มีขนาดของซิลิเกตเคลย์จะอยู่ระหว่าง 0.01-5.0 ไมครอน

1.2) พื้นที่ผิว (surface area) ซิลิเกตเคลย์ มีขนาดเล็กมาก และเป็นแผ่นแบบและบาง จึงทำมีพื้นที่ผิวมีค่าสูง นอกจากนี้ ซิลิเกตเคลย์ยังมีพื้นที่ผิวภายใน ซึ่งอยู่ตามหลืบระหว่างแผ่นผลึกของซิลิเกตเคลย์ที่ซ้อนทับกันอยู่เป็นอนุภาค ทำให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทรงกลมและลูกบาศก์

1.3) ความเหนียว (cohesion) และอ่อนตัว (plasticity) ความเหนียวหมายถึง ความสามารถเกาะยึดกันได้ระหว่างอนุภาคของดินเหนียวเมื่อดินเหนียวมีความชื้นที่เหมาะสมจะมีความอ่อนนุ่ม สามารถบีบปั้นให้เป็นรูปต่าง ๆ ได้ จะเห็นได้ว่าความเหนียวและความอ่อนตัวจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของดินเหนียวเป็นอย่างมาก ถ้าหากดินเหนียวมีพื้นที่ผิวมาก น้ำก็เกาะยึดอยู่ได้มาก ทำให้อนุภาคของดินเหนียวเกาะติดกันได้ดี และมีความอ่อนตัวจะมีสภาพเหนียวและเกาะติดมือ และการไถพรวนดินทำได้ลำบาก ตรงข้ามถ้าหากดินมีพื้นที่ผิวดินเหนียวน้อยถึงแม้จะมี

ความชื้นมากก็ไปทำให้ดินเหนียวไม่สามารถเกาะติดกับดินเหนียวของอนุภาคอื่นได้ดี ทำให้ดินมีสภาพร่วนไม่เหนียวและการไถพรวนดินก็ทำได้ง่าย

1.4) การขยายตัว (swelling) และการหดตัว (shrinking) การขยายตัวและการหดตัวขึ้นอยู่กับช่องว่างหรือหลืบระหว่างแผ่นผลึกที่ซ้อนทับ เมื่อน้ำเข้าไปอยู่หลืบ (inter layer) มากขึ้นทำให้หลืบระหว่างดินเหนียวอ้ามากขึ้นทำให้ดินเหนียวเมื่อเปียกน้ำทำให้เกิดการพองหรือการขยายตัว แต่เมื่อน้ำในหลืบของดินเหนียวระเหยออกไปก็จะทำให้หลืบของดินเหนียว นั้นยุบตัวลง ทำให้เกิดการหดตัว จะเห็นได้จากดินในท้องนาในหน้าร้อน ดินจะแตกระแหงเนื่องจากการหดตัวของดินเหนียวส่วนในหน้าฝนเมื่อดินชื้นการแตกระแหงจะหายไป เนื่องจากดินเกิดการพองหรือขยายตัว

1.5) ประจุลบ (electronegative charge) และการดูดยึดไอออนบวก (adsorption of cation) บริเวณผิวของอนุภาคดินเหนียว จะมีประจุลบอยู่จำนวนมากเมื่อดินเหนียวอยู่ในสภาพแขวนลอยจะมีอนุภาคของน้ำและแคตไอออน (cation) มาเกาะอยู่ที่ดินเหนียว เต็มไปหมดสภาพเช่นนี้เราเรียกว่าเคลย์ ไมเซลล์ (clay micelle) ไอออนบวกที่ถูกยึดอยู่ที่ผิวของดินเหนียวจะถูกยึดแบบหลวม ๆ สามารถถูกไล่ที่ได้ด้วยแคตไอออนชนิดอื่น ๆ ได้ ซึ่งเรียกแคตไอออนพวกนี้ว่า แคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable cation) ดินส่วนใหญ่พบว่ามี แคตไอออน พวกไฮโดรเจนไอออน โปตัสเซียมไอออน โซเดียมไอออน แมกนีเซียมไอออน และแคลเซียมไอออนเกาะที่ผิวของดินเหนียว

1.6) โครงสร้างและชนิดของซิลิเกตเคลย์ นักวิทยาศาสตร์สามารถหาโครงสร้างของซิลิเกตเคลย์โดยใช้รังสีเอกซ์

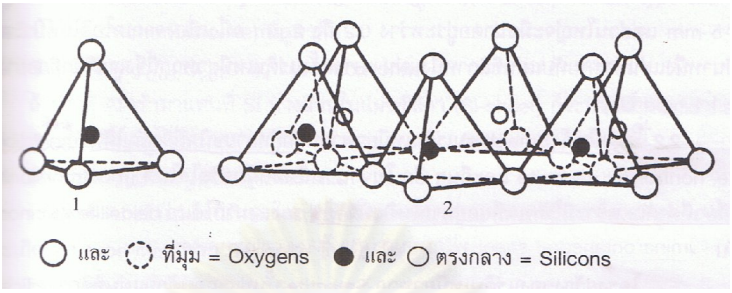
2) โครงสร้างของซิลิเกตเคลย์

คุณสมบัติที่สำคัญในการกำหนดโครงสร้างของซิลิเกตเคลย์ ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพที่ประกอบด้วย พื้นที่ผิว ความเหนียว ความอ่อนตัว และการขยายตัว รวมทั้งคุณสมบัติทางเคมีได้แก่ ไอออนลบที่อยู่บริเวณผิวของซิลิเกตเคลย์ ซึ่งจะมีไอออนบวกต่างๆเช่น ไฮโดรเจนไอออน โซเดียมไอออน และโปตัสเซียม เป็นต้น มาเกาะบริเวณผิวของซิลิเกตเคลย์ เป็นจำนวนมาก ซิลิเกตเคลย์ประกอบด้วย

2.1) หน่วยที่สำคัญของผลึกของเคลย์

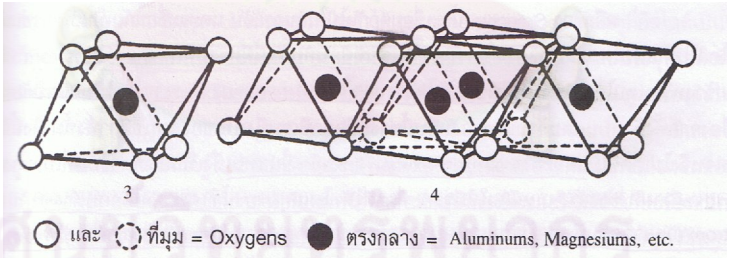
2.1.1) หน่วยของซิลิกาเตตระฮีดรัล (silica tetrahedral unit) ประกอบด้วย ธาตุซิลิกา 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยธาตุออกซิเจน 4 อะตอม เกิดเป็นรูปทรงที่มีสี่ด้านเรียกว่า หน่วยของเตตระฮีดรัล (tetrahedral unit) ทำให้เกิดเป็นแผ่นคล้ายรังผึ้ง คือจะเป็นแผ่นที่มี

ช่วงรูปหกเหลี่ยมอยู่ทั่วไป เรียกว่า แผ่นของซิลิกาเตตระฮีดรัล (silica tetrahedral sheet) หรือเรียกว่า แผ่นซิลิกา (silica sheet) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของซิลิกาเตตระฮีดรัล
(คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

2.1.2) หน่วยของอลูมินาออกตาฮีดรัล (alumina octahedral unit) ประกอบด้วยธาตุอลูมินัม 1 อะตอม อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอม ทำให้เกิดเป็นรูปทรงที่มีแปดด้านขึ้นเรียกว่าแผ่นอลูมินาออกตาฮีดรัล (alumina octahedral sheet) หรือ แผ่นอลูมินา (alumina sheet) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของอลูมินาออกตาฮีดรัล
(คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ซิลิเกตเคลย์ ทุกชนิดประกอบด้วยหน่วยโครงสร้างดังกล่าวแทบทั้งสิ้นซิลิเกตเคลย์ชนิดต่าง ๆ เกิดขึ้นจากการแตกต่างกันที่กันเรียงซ้อนทับของแผ่นซิลิกาและแผ่นอลูมินาและการแลกเปลี่ยนการแทนที่ของซิลิกอน (Si) และอลูมิเนียม (Al)

2.2.3 สมบัติดิน

2.2.3.1 สมบัติทางกายภาพ (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2538)

1) พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area)

เนื้อดินสามารถบอกถึงปริมาณคอลลอยด์อนินทรีย์อย่างหยาบได้ ทั้งนี้เพราะอนุภาคดินเหนียวมีขนาดเล็กมากอีกทั้งอยู่ในสภาพคอลลอยด์ จึงทำให้มีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักเป็นปริมาณมาก ดินที่มีลักษณะเป็นเนื้อละเอียดจะมีพื้นที่ผิวสูงขึ้น การเพิ่มพื้นที่ผิวให้สูงขึ้นในดินเนื้อหยาบก็สามารถทำได้ โดยการเติมคอลลอยด์อินทรีย์ลงไป ซึ่งได้แก่ ฮิวมัส การเพิ่มขึ้นอินทรียวัตถุให้แก่ดิน เมื่อสลายตัวก็จะให้ฮิวมัสแก่ดิน

2) ความพรุนของดิน (soil porosity)

เนื้อดินหยาบจะมีช่อง (pore) ขนาดใหญ่อยู่มาก แต่จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย เมื่อดินแห้งลงจะอุ้มน้ำได้น้อยทำให้ก๊าซถ่ายเทได้ดี ส่วนในดินที่มีปริมาณซิลท์สูง เมื่อฝนตกหรือระหว่างรดน้ำจะสูญเสียโครงสร้างดินได้ง่าย ซิลท์จะไหลลงอุดตันช่องทำให้ผิวหน้าดินปิด ดังนั้นแม้การรดน้ำเพียงเล็กน้อยก็อาจทำให้ช่องบนผิวหน้าผิวดินปิด ทำให้น้ำและก๊าซถ่ายเทได้น้อยลง โดยทั่วไปแล้วช่องขนาดเล็ก (micropore) ในดิน ก็ยังมีความสัมพันธ์กับเนื้อดิน คือ เนื้อดินละเอียดจะมีช่องขนาดเล็กมากกว่าดินเนื้อหยาบ ซึ่งช่องขนาดเล็กจะสามารถดูดซึมน้ำเอาไว้ได้ ทำให้ดินเนื้อละเอียดมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ (available water capacity : AWC) มากกว่าดินเนื้อหยาบ ส่วนของน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีความสำคัญต่อพืช และจุลินทรีย์ในดินเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ดินเป็นแหล่งทิ้งวัสดุเหลือใช้ และต้องการให้ระบบดิน-พืช เป็นตัวการกำจัดสารมลพิษและวัสดุเหลือใช้ดังกล่าว

3) การดูดซับ (adsorption) และการดูดซึม (absorption)

การดูดซึมที่สำคัญในดินคือ การดูดซึมน้ำ น้ำจะถูกดินดูดไว้ในช่องระหว่างอนุภาคดินช่องในดินไม่อาจดูดซึมน้ำไว้ได้ทั้งหมด ทั้งนี้เพราะแรงดูดซึมต้องเอาชนะอิทธิพลแรงดึงดูดของโลกให้ได้ แรงดูดซึมนี้มีความสัมพันธ์โดยแปรผกผันกับขนาดของช่อง ยิ่งช่องมีขนาดเล็กแรงดูดซึมก็ยิ่งมาก ดังนั้นปริมาณน้ำที่ดูดซึมไว้จึงมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคของดิน ดินที่มีอนุภาคดินเหนียวในปริมาณมาก (เนื้อดินละเอียด) จะดูดซึมน้ำได้มาก ปริมาณอินทรียวัตถุในดินที่สูงก็จะอุ้มน้ำไว้ได้มาก

4) อินทรียวัตถุในดิน (คมสรร ศิริติกุล, 2547)

4.1) อิทธิพลของอินทรียวัตถุที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของดินที่เห็นได้ชัดคือสีของดิน ดินที่มีอินทรียวัตถุอยู่ในปริมาณสูงจะมีสีเข้ม อาจจะมีสีน้ำตาลไปจนถึงสีดำ ยกเว้นในกรณีที่ดินมีปริมาณแมงกานีสอยู่สูงมากก็อาจทำให้ดินมีสีดำได้เหมือนกัน การจับตัวกัน

เป็นก้อนของอนุภาคดิน ต้องอาศัยอินทรียวัตถุเข้ามามีส่วนช่วยอย่างมาก โดยเฉพาะดินที่มีลักษณะเป็นทราย ทั้งนี้อินทรียวัตถุจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างอนุภาคของดินให้จับตัวกันเป็นเม็ดดิน ในทำนองเดียวกันดินเหนียวที่อนุภาคดินจับตัวกันแน่นทึบ อินทรียวัตถุก็จะช่วยให้ดินจับตัวกันเป็นก้อนแยกออกจากกันได้บ้าง ทำให้ดินร่วนขึ้น ดังนั้นอินทรียวัตถุจึงมีส่วนช่วยทำให้ดินมีสมบัติทางกายภาพเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช ไม่ว่าดินจะมีลักษณะเป็นทรายหรือมีสภาพเป็นดินเหนียวก็ตาม

นอกจากนี้อินทรียวัตถุช่วยให้ดินเหนียวมีการระบายน้ำดีขึ้น เนื่องจากอินทรียวัตถุช่วยทำให้ดินเหนียวจับตัวกันเป็นก้อนได้ดี จึงทำให้มีช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างก้อนดินเพิ่มขึ้น เมื่อมีน้ำอยู่ในดินปริมาณที่เกินกว่าความสามารถของดินจะดูดซับไว้ได้แล้ว มันจะไหลลงไปสู่ดินชั้นล่าง หรือระเหยไปจากดินโดยผ่านทางช่องว่างระหว่างอนุภาคของดินได้ง่าย ในทางตรงข้ามอินทรียวัตถุก็ยังช่วยให้ดินทรายหรือดินที่มีเนื้อหยาบอุ้มน้ำได้ดีขึ้น เพราะสมบัติทางกายภาพของอินทรียวัตถุมีลักษณะมีช่องว่างมาก และมีความพรุนสูง จึงดูดซับน้ำไว้ได้ดี

4.2) อินทรียวัตถุมีอิทธิพลต่อสมบัติทางเคมีของดินโดยทางตรงและทางอ้อมสำหรับอิทธิพลโดยทางตรงก็คือ อินทรียวัตถุเป็นอินทรีย์สารชนิดหนึ่ง ขณะที่สลายตัวในดินได้ปลดปล่อยกรดอินทรีย์ออกมาหลายชนิด ซึ่งก็เป็นจำพวกกรดอ่อนเสียส่วนมาก จนกระทั่งเหลือส่วนที่มีความเสถียรมากที่สุด ที่เรียกกันว่า ฮิวมัส (humus) ด้วยเหตุนี้อินทรียวัตถุจึงช่วยให้ดินมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลง pH ได้เป็นอย่างดี อิทธิพลของอินทรียวัตถุที่มีต่อสมบัติทางเคมีที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้สูงกว่าสารคอลลอยด์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนโดยเฉพาะสารฮิวมัสย่อมจะมีประจุลบและประจุบวกอยู่มากมายจึงสามารถแลกเปลี่ยนประจุตรงข้ามได้มาก ส่วนอิทธิพลของอินทรียวัตถุที่มีต่อดินโดยทางอ้อม เป็นแหล่งให้ธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช โดยเฉพาะธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน อันเป็นองค์ประกอบสำคัญของสารอินทรีย์ส่วนมาก นอกจากนี้ยังมีธาตุคาร์บอนซึ่งเป็นแหล่งพลังงานอันสำคัญของจุลินทรีย์ในดิน

4.3) อิทธิพลของอินทรียวัตถุที่มีต่อชีวภาพของดิน จุลินทรีย์ในดินหลายชนิดโดยเฉพาะพวก Heterotrophic ซึ่งอาศัยพลังงานและธาตุคาร์บอนจากอินทรียวัตถุโดยตรง มีอยู่ส่วนน้อยที่อาศัยพลังงานจากกระบวนการ Oxidation ของส่วนที่เป็นแร่ธาตุต่างๆในดิน นอกจากนี้อินทรียวัตถุยังเป็นแหล่งให้ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์แก่จุลินทรีย์ในดินก็สูงตามไปด้วย เพราะมีแหล่งอาหารและพลังงานในปริมาณที่เพียงพอ

4.4) อิทธิพลของอินทรียวัตถุที่มีต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช และธาตุอาหารพืชหลายชนิดที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของอินทรียวัตถุในดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งธาตุไนโตรเจน เนื่องจากธาตุไนโตรเจนไม่พบว่าเป็นองค์ประกอบอยู่ในแร่ปฐมภูมิชนิดใดเลย แต่บางส่วนที่ถูกตรึงไว้กับแร่ดินเหนียวในรูป NH_4^+

อยู่บ้าง ซึ่งก็ถือว่าเป็นจำนวนน้อยไนโตรเจนส่วนใหญ่จะอยู่ในดินในรูปของสารอินทรีย์ เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว ปริมาณของอินทรียวัตถุอย่างเดียวจะมีมากกว่า ธาตุไนโตรเจน ประมาณ 20 เท่า หรือ อาจจะกล่าวได้ว่าอัตราส่วนของปริมาณอินทรียวัตถุต่อปริมาณไนโตรเจนในดินเท่ากับ 20:1

อินทรียวัตถุมีความสำคัญต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินเกี่ยวกับธาตุอาหารพืชชนิดอื่นๆ ที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่สำคัญก็คือ ฟอสฟอรัสและกำมะถัน นอกจากนี้ยังมี K^{+} Ca^{2+} และ Mg^{2+} อีกด้วย นอกเหนือจากอิทธิพลของอินทรียวัตถุที่มีต่อปริมาณธาตุอาหารในดินโดยตรงแล้วยังมีอิทธิพลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ และความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดความเป็นด่าง และความเป็นเกลือในดินได้เช่นเดียวกัน

4.5) อิทธิพลของดินอินทรียวัตถุที่มีต่อกษัยการของดิน อินทรียวัตถุในดินช่วยทำให้โครงสร้างของดินดีขึ้นและทำให้โครงสร้างมีความคงทน ถ้าอยู่บริเวณหน้าดินจะป้องกันผิวหน้าของดินไม่ให้จับตัวกันเป็นแผ่น และป้องกันไม่ให้จับตัวกันแน่นทึบ ทำให้การซึมซาบของน้ำลงไปในดินเพิ่มมากขึ้น เป็นการลดการไหลบ่าของน้ำไปตามผิวดิน จึงลดกษัยการของดินได้ในที่สุด ด้วยเหตุนี้ดินที่มีอินทรียวัตถุในปริมาณสูง ย่อมเกิดกษัยการของดินได้น้อยลง

5) สภาพความชื้นดินและการเคลื่อนย้ายของน้ำ (สุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2538)

ความแตกต่างในด้านความสามารถอุ้มน้ำของดินเป็นผลมาจากความแตกต่างของเนื้อดิน ดังนั้นเนื้อดินจึงเป็นปัจจัยควบคุมระดับการชะละลาย (leaching) ของดินและการแทรกซึม (infiltration) ลงของน้ำจากบนดินเข้าสู่ผิวดิน ในตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นอัตราการแทรกซึมลงของน้ำ และความสามารถอุ้มน้ำของดินที่สภาพความจุที่ความชื้นปกติ ในประเภทเนื้อดินต่าง ๆ ซึ่งทั้งอัตราการแทรกซึมลงของน้ำและความสามารถอุ้มน้ำของดินสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มปริมาณอินทรียวัตถุในดิน และการปรับปรุงโครงสร้างดินจึงเป็นการลดอัตราการแทรกซึมลง และเป็นการลดความจุในการอุ้มน้ำของดิน

ตารางที่ 2.2 อัตราการแทรกซึมลงและความสามารถในการอุ้มน้ำของดินที่ระดับความจุความชื้นปกติ (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2538)

เนื้อดิน	การแทรกซึมลง (นิ้ว/ชม.)		ปริมาณน้ำทั้งหมด (นิ้ว/ฟุตของความลึก)
	ดินพืชปกคลุม	ดินว่าง	
ร่วนเหนียว	0.2	0.1	4.8
ร่วนปนทรายแป้ง	0.6	0.3	4.2
ร่วน	1.0	0.5	3.8
ร่วนปนทราย	2.0	1.0	1.2

2.2.3.2 สมบัติทางเคมี (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2538)

1) ความเป็นกรด-ด่างของดิน (pH)

การวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของดินคล้ายคลึงกับการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ คือ การวัดพีเอชของดิน แต่แตกต่างกันที่ดินนั้นมีความเป็นกรดอยู่ 2 ชนิดคือ กรดจริงและกรดแฝง พืชแต่ละชนิดจะมีค่าพีเอชในดินที่เหมาะสมแตกต่างกัน (ตารางที่ 2.3)

ดินมีทั้งประจุบวกและลบ แต่มีค่าประจุลบมากกว่า การที่มีประจุนี้นับว่าเป็นประโยชน์มาก เพราะธาตุต่าง ๆ ในสารละลายดินรวมทั้งธาตุอาหารของพืชในรูปที่พืชดูดกินได้จะต้องอยู่ในรูปประจุเช่นกัน ธาตุอาหารพืชโดยส่วนใหญ่มีประจุเป็นบวก ดังนั้นจึงถูกดินดูดซับไว้ไม่ไหลตามน้ำลงไปจนเลยระดับความลึกของราก ทำให้ธาตุอาหารที่ถูกดินดูดซับเอาไว้นี้ย่อมมีโอกาสให้พืชดึงดูดเอาไปใช้ได้

ไฮโดรเจนไอออนนั้นมีประจุบวก ดังนั้นส่วนของไฮโดรเจนที่ถูกดินดูดซับ จึงเรียกว่า สภาพกรดแฝง (potential acidity) ส่วนของกรดที่มีบทบาทต่อความสามารถในการละลายได้ของธาตุและความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชนี้ คือ ส่วนสภาพกรดจริง ดังนั้นดินเหนียวและดินทรายที่มีค่าพีเอชเท่ากัน จะมีความต้องการปูนในการยกระดับพีเอชไม่เท่ากันได้ เพราะดินทั้งสองชนิดมีค่ากรดแฝงไม่เท่ากัน เนื่องจากดินเหนียวมีค่าประจุลบมากกว่าจึงมีสภาพกรดแฝงมากกว่า ส่วนของไฮโดรเจนที่ถูกดูดซับจะมีปริมาณมากกว่าส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และจะปลดปล่อยจากส่วนที่ถูกดูดซับออกมาเป็นบางส่วน ลักษณะคล้ายการแตกตัวของกรดอ่อน

ตารางที่ 2.3 ค่าพีเอช (pH) ของดินที่เหมาะสมกับพืชบางชนิด (สุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2538)

ชนิดของพืช	ค่าพีเอชของดินที่เหมาะสม
ข้าว	5.5-6.0
ผักกาดหัว, กะหล่ำดอก, ขึ้นฉ่าย, ถั่วลันเตา, ผักกาดหอม	6.0-7.0
กะหล่ำปลี, แครอท, คะน้า	5.7-7.0
ยาสูบ	5.4-5.7
มันเทศ	5.5-7.0
ฝ้าย	6.0-8.0
สับปะรด	5.0-6.0

2) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity : CEC) (นงคราญ กาญจนประเสริฐ และคณะ, 2546)

การที่ดินมีประจุไฟฟ้าเป็นผลเนื่องมาจากอนุภาคของดินเหนียวและอินทรียวัตถุในดิน โดยส่วนใหญ่อนุภาคของดินเหนียวมีรูปร่างแบนบางทำให้มีโอกาสที่อะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่รอบนอกจะหลุดออกไปได้มากขึ้น เมื่อสารประกอบใดเกิดมีการสูญหายของอะตอมก็จะมีประจุทันที ประจุที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นประจุลบ ดินมีความสามารถในการดึงดูดแคตไอออนไว้ไม่เท่ากัน แคตไอออนที่ถูกดูดซับ (adsorbed cation) กับคอลลอยด์ดินจะสามารถเปลี่ยนแปลงกันได้กับแคตไอออนในสารละลายดิน จึงมีชื่อเรียกว่า แคตไอออนแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable cation)

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก หมายถึงผลรวมของประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดของดิน มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมสมมูลย์ต่อดินแห้ง 100 กรัม

ค่า ซี อี ซี ของดินไร่ในภาคต่าง ๆ ของประเทศไทย (ตารางที่ 2.4) พบว่า ดินในภาคใต้ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคตะวันออกของประเทศไทย ดินส่วนใหญ่เป็นดินเนื้อหยาบ จะมีค่า ซี อี ซี ต่ำกว่า 5 มิลลิอิควิวาเลนต์ ต่อดิน 100 กรัม ส่วนในภาคกลางและภาคเหนือดินส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นดินเนื้อละเอียดกว่าจึงมีค่าซี อี ซี สูงกว่า 10 มิลลิอิควิวาเลนต์ ต่อดิน 100 กรัม โดยเฉพาะดินในภาคกลาง 50 เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างดินมีค่า ซี อี ซี สูงกว่า 10 มิลลิอิควิวาเลนต์ ต่อดิน 100 กรัม ทั้งนี้เพราะดินในภาคกลางส่วนใหญ่เป็นดินเหนียว

ตารางที่ 2.4 ค่าซีอีซีของดินไร่ในภาคต่างๆของประเทศไทย (นงคราญ กาญจนประเสริฐ และคณะ, 2546)

ภาค	จำนวนตัวอย่างทั้งหมด	จำนวนตัวอย่างดินแจกแจงตามค่าซีอีซี (มิลลิอิควิวาเลนต์ ต่อดิน 100 กรัม)			
		< 5	5 – 10	10 – 20	> 20
กลาง	28	8	6	10	4
เหนือ	16	7	5	3	1
ใต้	34	26	7	1	-
ตะวันออกเฉียงเหนือ	41	35	3	1	2
ตะวันออก	13	10	2	1	-

ประโยชน์ทางด้านการเกษตร ธาตุอาหารพืชส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแคตไอออน จึงสามารถถูกดินยึดไว้ที่ผิวเคลย์ไมเซลล์ของพืชสามารถนำเอาแคตไอออนเหล่านี้มาใช้ในการเจริญเติบโตได้ในการใส่ปุ๋ยโปตัสเซียมลงไปในดิน โปตัสเซียมไอออนจะไปไล่ที่ไฮโดรเจนไอออน และแคลเซียมไอออนที่เกาะยึดที่ผิวเคลย์ไมเซลล์ทำให้ดินมีโปตัสเซียมไอออนเกาะยึดกับเคลย์ไมเซลล์ ทำให้ดินไม่ขาดธาตุโปตัสเซียมไอออนแม้ว่าจะมีการชะล้างที่เกิดจากน้ำ ในการทำดินให้ร่วนซุยเหมาะสำหรับการเพาะปลูกโดยใช้ความรู้จากการแลกเปลี่ยนแคตไอออน ตัวอย่างเช่น ถ้าดินของเรามีปริมาณโซเดียมในดินปริมาณมาก ทำให้เกิดดินเหนียว น้ำซึมผ่านได้ยาก ไถพรวนลำบาก เมื่อแห้งดินจะแข็งแตกระแหงไม่เหมาะต่อการเพาะปลูก ถ้าเราเติมแคลเซียมไอออนลงไปในดิน

แคลเซียมไอออนจะไปแทนที่ โซเดียมไอออนก็จะทำให้ดินไม่เหนียว ร่วนซุยขึ้น การซึมของน้ำก็ดีขึ้น ทำให้การไถพรวนสะดวกขึ้น ดินที่เป็นกรดเราสามารถนำเอาความรู้เกี่ยวกับ ซี อี ซี ไปปรับปรุงดินกรดได้ โดยเราใส่พวกแคลเซียมไอออนลงไปในดิน แคลเซียมไอออนจะไปไล่ที่ไฮโดรเจนไอออนที่อยู่เกาะติดกับ เคลย์ไมเซลล์ ให้หลุดออกทำให้ความเป็นกรดลดลง เนื่องจากความเป็นกรดขึ้นอยู่กับปริมาณของไฮโดรเจนไอออน

2.3 ข้าว (*Oryza sativa* L.)

รูปที่ 2.4 ข้าว
(http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%82%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%A7#.E0.B8.94.E0.B8.B9.E0.B9.80.E0.B8.9E.E0.B8.B4.E0.B9.88.E0.B8.A1)

2.3.1 ประวัติข้าวไทย (มูลนิธิข้าวไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2551)

พันธุ์ข้าวที่มนุษย์เพาะปลูกในปัจจุบันพัฒนามาจากข้าวป่าในตระกูล Oryza gramineae สันนิษฐานว่า พืชสกุล Oryza มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนชื้นของทวีป Gondwanaland ก่อนผืนดินจะเคลื่อนตัวและเคลื่อนออกจากกันเป็นทวีปต่าง ๆ เมื่อ 230-600 ล้านปีมาแล้วจากนั้นกระจายจากเขตร้อนชื้นของแอฟริกา เอเชียใต้ เอเชียตะวันออกเฉียงเหนือ ออสเตรเลีย อเมริกากลางและใต้ ข้าวสามารถเจริญเติบโตได้ตั้งแต่ความสูงระดับน้ำทะเลถึง 2,500 เมตรหรือมากกว่า ทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น ทั้งในที่ราบลุ่มจนถึงที่สูง ครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่เส้นรุ้งที่ 53 องศาเหนือถึง 35 องศาใต้ มนุษย์ได้คัดเลือกข้าวป่าชนิดต่างๆ ตามความต้องการของตน เพื่อให้สอดคล้องกับระบบนิเวศน์ มีการผสมพันธุ์ข้ามระหว่างข้าวที่ปลูกกับวัชพืชที่เกี่ยวข้อง เกิดข้าวพื้นเมืองมากมายหลายสายพันธุ์ ซึ่งสามารถให้ผลผลิตสูง ปลูกได้ตลอดปี ก่อให้เกิดพันธุ์ข้าวปลูกที่เรียกว่า ข้าวลูกผสมซึ่งมีปริมาณ 120,000 พันธุ์ทั่วโลก ข้าวที่ปลูกในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) ข้าวแอฟริกา (Oryza glaberrima) แพร่กระจายอยู่เฉพาะบริเวณเขตร้อนของแอฟริกาเท่านั้น สันนิษฐานว่าข้าวแอฟริกาอาจเกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อประมาณ 1,500 ปีก่อนคริสต์ศักราช

2) ข้าวเอเชีย เป็นข้าวลูกผสม เกิดจาก Oryza sativa กับข้าวป่า มีถิ่นกำเนิดบริเวณประเทศอินเดีย บังคลาเทศ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ปลูกกันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อินเดีย ตอนเหนือของบังคลาเทศ บริเวณดินแดนสามเหลี่ยมระหว่างพม่า ไทย ลาว เวียดนาม และจีนตอนใต้ ข้าวเอเชียแบ่งออกเป็น 3 สายพันธุ์ ดังนี้

2.1) ข้าวสายพันธุ์แรกเรียกว่าสายพันธุ์ Senica หรือ Japonica ปลูกบริเวณแม่น้ำเหลืองของจีน แพร่ไปยังเกาหลีและญี่ปุ่น เมื่อประมาณ 300 ปีก่อนคริสต์ศตวรรษ เป็นข้าวเมล็ดป้อม

2.2) ข้าวสายพันธุ์ที่สอง เรียกว่า Indica เป็นข้าวเมล็ดยาวปลูกในเขตร้อนแพร่สู่ตอนใต้ของอินเดีย ศรีลังกา แหลมมาลายู หมู่เกาะต่าง ๆ และลุ่มแม่น้ำแยงซีของจีนประมาณคริสต์ศักราช 200

2.3) ข้าวสายพันธุ์ที่สาม คือ ข้าวชวา (Javanica) ปลูกในอินโดนีเซียประมาณ 1,084 ปีก่อนคริสต์ศักราช จากนั้นแพร่ไปยังฟิลิปปินส์และญี่ปุ่น ในข้าวเอเชียแพร่เข้าไปในยุโรปและแอฟริกา สู่อเมริกาใต้ อเมริกากลาง เข้าสู่สหรัฐอเมริกาครั้งแรกประมาณคริสต์ศตวรรษที่ 17 โดยนำเมล็ดพันธุ์ไปจากหมู่เกาะมาดากัสกา

2.3.2 ลักษณะที่สำคัญของข้าว (http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK3/chapter1/t3-1-l1.htm#sect1)

ลักษณะที่สำคัญของข้าวแบ่งออกได้เป็นลักษณะที่เกี่ยวกับการเจริญเติบโต และลักษณะที่เกี่ยวกับการขยายพันธุ์ ดังนี้

1) ลักษณะที่เกี่ยวกับการเจริญเติบโต

1.1) ราก รากเป็นส่วนที่อยู่ใต้ผิวดิน ใช้ยึดลำต้นกับดินเพื่อไม่ให้ต้นล้ม แต่บางครั้งก็มีรากพิเศษเกิดขึ้นที่ข้อซึ่งอยู่เหนือพื้นดินด้วย ต้นข้าวไม่มีรากแก้ว แต่มีรากฝอยแตกแขนงกระจายแตกแขนงอยู่ใต้ผิวดิน

1.2) ลำต้น มีลักษณะเป็นโพรงตรงกลางและแบ่งออกเป็นปล้องๆ โดยมีข้อกั้นระหว่างปล้อง ความยาวของปล้องนั้นแตกต่างกัน จำนวนปล้องจะเท่ากับจำนวนใบของต้นข้าว ปกติมีประมาณ 20-25 ปล้อง

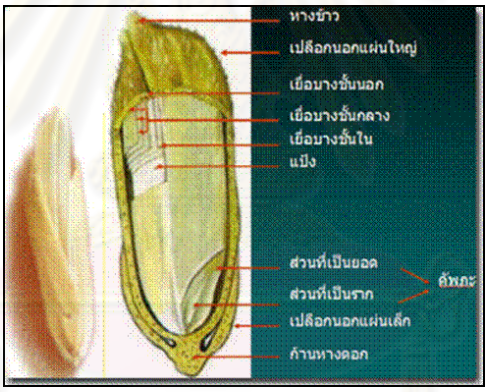
1.3) ใบ ต้นข้าวมีใบไว้สำหรับสังเคราะห์แสง เพื่อเปลี่ยนแร่ธาตุ อาหาร น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นแป้ง เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างเมล็ดของต้นข้าว ใบประกอบด้วย กาบใบและแผ่นใบ

2) ลักษณะที่เกี่ยวกับการขยายพันธุ์ (รูปที่ 2.5)

2.1) รวงข้าว หมายถึง ช่อดอกของข้าว ซึ่งเกิดขึ้นที่ข้อของปล้องอันสุดท้ายของต้นข้าว ระยะระหว่างข้ออันบนของปล้องอันสุดท้ายกับข้อต่อของใบธง เรียกว่า คอรวง

2.2) ดอกข้าว หมายถึง ส่วนที่เกสรตัวผู้และเกสรตัวเมียสำหรับผสมพันธุ์ ดอกข้าวประกอบด้วยเปลือกนอกใหญ่สองแผ่นประสานกัน เพื่อห่อหุ้มส่วนที่อยู่ภายในไว้ เปลือกนอกใหญ่แผ่นนอก เรียกว่า เลมมา (lemma) ส่วนเปลือกนอกใหญ่แผ่นใน เรียกว่า พาเลีย (palea) ทั้งสองเปลือกนี้ภายนอกของมันอาจมีขนหรือไม่มีขนก็ได้

2.3) เมล็ดข้าว หมายถึง ส่วนที่เป็นแป้งที่เรียกว่าเอ็นโดสเปิร์มและส่วนที่เป็นคัพภะ ซึ่งห่อหุ้มไว้โดยเปลือกนอกใหญ่สองแผ่น เอ็นโดสเปิร์มเป็นแป้งที่เราบริโภค คัพภะเป็นส่วนที่มีชีวิตและงอกออกมาเป็นต้นข้าวเมื่อเอาไปเพาะ



รูปที่ 2.5 ลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการขยายพันธุ์

(http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK3/chapter1/t3-1-l1.htm#sect1)

2.3.3 ชนิดของข้าว (มูลนิธิข้าวไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2551)

1) แบ่งตามประเภทของเนื้อแข็งในเมล็ดข้าวสาร

แบ่งได้เป็นข้าวเจ้าและข้าวเหนียว ซึ่งมีต้นและลักษณะอย่างอื่นเหมือนกันทุกอย่าง แตกต่างกันที่ประเภทของเนื้อแข็งในเมล็ด เมล็ดข้าวเจ้าประกอบด้วยแป้งอมิโลส (Amylose) ประมาณร้อยละ 15-30 ส่วนเมล็ดข้าวเหนียวประกอบด้วยแป้งอมิโลเพคติน (Amylopectin) เป็นส่วนใหญ่และมีแป้งอมิโลสเพียงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 5-7 เท่านั้น

2) แบ่งตามสภาพพื้นที่เพาะปลูก

2.1) ข้าวไร่ (Upland rice) เป็นข้าวที่ปลูกได้ทั้งบนที่ราบและที่ลาดชันไม่ต้องทำคันนาเก็บกักน้ำ นิยมปลูกกันมากในบริเวณที่ราบสูงตามไหล่เขาทางภาคเหนือ ภาคใต้ ภาคตะวันออกและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ คิดเป็นเนื้อที่เพาะปลูกประมาณร้อยละ 10 ของเนื้อที่เพาะปลูกทั่วประเทศ

2.2) ข้าวนาสวนหรือนาดำ (Lowland rice) เป็นข้าวที่ปลูกในที่ลุ่มทั่วไป ในสภาพที่มีน้ำหล่อเลี้ยงต้นข้าวตั้งแต่ปลูกจนกระทั่งก่อนเก็บเกี่ยว โดยที่สามารถรักษาระดับน้ำได้ และระดับน้ำต้องไม่สูงเกิน 1 เมตร ข้าวนาสวนนิยมปลูกกันมากแทบทุกภาคของประเทศคิดเป็นเนื้อที่เพาะปลูก ประมาณร้อยละ 80 ของเนื้อที่เพาะปลูกทั่วประเทศ

2.3) ข้าวขึ้นน้ำหรือข้าวนาเมือง (Floating rice) เป็นข้าวที่ปลูกในแหล่งที่ไม่สามารถรักษาระดับน้ำได้ บางครั้งระดับน้ำในบริเวณที่ปลูกอาจสูงกว่า 1 เมตร ต้องใช้ข้าวพันธุ์พิเศษที่เรียกว่า ข้าวลอย หรือ ข้าวฟ่างลอย ส่วนมากปลูกแถบจังหวัดพระนครศรีอยุธยา สุพรรณบุรี ลพบุรี พิจิตร อ่างทอง ชัยนาทและสิงห์บุรี คิดเป็นเนื้อที่เพาะปลูกประมาณร้อยละ 10 ของเนื้อที่เพาะปลูกทั่วประเทศ

3) แบ่งตามอายุการเก็บเกี่ยว

แบ่งเป็นข้าวเบา ข้าวกลางและข้าวหนัก ข้าวเบามีอายุการเก็บเกี่ยว 90-100 วัน ข้าวกลางมีอายุการเก็บเกี่ยว 100-120 วัน และข้าวหนักมีอายุการเก็บเกี่ยว 120 วันขึ้นไป อายุการเก็บเกี่ยวนับแต่วันเพาะกล้าหรือหว่านข้าวในนาจนเก็บเกี่ยว

4) แบ่งตามลักษณะความไวต่อช่วงแสง

ข้าวที่ไวต่อช่วงแสงจะมีอายุการเก็บเกี่ยวที่ไม่แน่นอน คือไม่เป็นไปตามอายุของต้นข้าว เพราะจะออกดอกในช่วงเดือนที่มีความยาวของกลางวันสั้นกว่ากลางคืน ในประเทศไทยช่วงดังกล่าวเริ่มเดือนตุลาคม ฉะนั้นข้าวพวกนี้ต้องปลูกในฤดูนาปี (ฤดูฝน) เท่านั้น ส่วนข้าวที่ไม่ไวต่อช่วงแสงสามารถปลูกได้ทุกฤดูกาล ข้าวขาวมะลิ 105 เป็นข้าวที่ไวต่อช่วงแสง ในขณะที่ข้าวปทุมธานี เป็นข้าวที่ไม่ไวต่อช่วงแสง

5) แบ่งตามรูปร่างของเมล็ดข้าวสาร

5.1) ข้าวเมล็ดสั้น (Short grain) ความยาวของเมล็ดไม่เกิน 5.50 มิลลิเมตร

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

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

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

6) แบ่งตามฤดูปลูก

6.1) ข้าวนาปีหรือข้าวนาน้ำฝน คือ ข้าวที่ปลูกในฤดูการทำนาปกติ เริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงตุลาคมและเก็บเกี่ยวเสร็จสิ้นล่าสุดไม่เกินเดือนกุมภาพันธ์

6.2) ข้าวนาปรัง คือ ข้าวที่ปลูกนอกฤดูการทำนาปกติ เริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม ในบางท้องที่จะเก็บเกี่ยวอย่างช้าที่สุดไม่เกินเดือนเมษายน นิยมปลูกในท้องที่ที่มีการชลประทานดี เช่น ในภาคกลาง

2.3.4 พันธุ์ข้าว

ข้าวที่นิยมบริโภคมีอยู่ 2 สปีชีส์ใหญ่ๆ คือ

1) *Oryza glaberrima* ปลูกเฉพาะในเขตร้อนของแอฟริกาเท่านั้น

2) *Oryza sativa* ปลูกทั่วไปทุกประเทศ ข้าวชนิด *Oryza sativa* ยังแยกออกได้เป็น

2.1) *Indica*

2.2) *Japonica*

2.3) *Javanica*

ข้าวที่ปลูกในประเทศไทยเป็นพวก *Indica* ซึ่งแบ่งออกเป็นข้าวเจ้าและข้าวเหนียว นอกจากนี้ ข้าวยังได้ถูกมนุษย์คัดสรรและปรับปรุงพันธุ์มาโดยตลอดตั้งแต่มีประวัติศาสตร์การเพาะปลูกข้าวในปัจจุบัน จึงมีหลายหลายพันธุ์ทั่วโลกที่ให้รสชาติและประโยชน์ใช้สอยต่างกันไป พันธุ์ข้าวที่มีชื่อเสียงระดับโลกของไทย คือ ข้าวหอมมะลิ

พันธุ์ข้าวที่สนใจในงานวิจัย คือ

1) กข 6 (RD6) (http://www.ricethailand.go.th/rkb/data_002/a1/rice_xx2-03_ricebreed_RD6.html)

รูปที่ 2.6 ข้าวเหนียว กข 6

(http://www.ricethailand.go.th/rkb/data_002/a1/rice_xx203_ricebreed_RD6.html)

ชื่อพันธุ์ : กข 6 (*Oryza sativa* L. cv. RD 6)

ชนิด : ข้าวเหนียว

ประวัติพันธุ์ : ได้จากการปรับปรุงพันธุ์ โดยการใช้รังสีชักนำให้เกิดการกลายพันธุ์ โดยใช้รังสีแกมมาปริมาณ 20 กิโลแรด อาบเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 แล้วนำมาปลูกคัดเลือกที่สถานีทดลองข้าวบางเขนและสถานีทดลองข้าวพิมาย จากการคัดเลือกได้ข้าวเหนียวหลายสายพันธุ์ในข้าวชั่วที่ 2 นำไปปลูกคัดเลือกจนอยู่ตัวได้สายพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงสุด คือ สายพันธุ์ KDML105'65-G_2U-68-254 นับว่าเป็นข้าวพันธุ์ดีพันธุ์แรกของประเทศไทยที่ค้นคว้าได้โดยวิธีชักนำพันธุ์พืชให้เปลี่ยนกรรมพันธุ์โดยใช้รังสี

การรับรองพันธุ์ : คณะกรรมการวิจัยและพัฒนากรมวิชาการเกษตร มีมติให้เป็นพันธุ์รับรองเมื่อวันที่ 4 พฤษภาคม 2520

ลักษณะประจำพันธุ์ : เป็นข้าวเหนียวสูงประมาณ 154 เซนติเมตร
ไวต่อช่วงแสง
ทรงกอกระจายเล็กน้อย ใบยาวสีเขียวเข้ม ใบธงตั้ง เมล็ดยาวเรียว
เมล็ดข้าวเปลือกสีน้ำตาล
ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 5 สัปดาห์
เมล็ดข้าวกล้อง กว้าง x ยาว x หนา = 2.2 x 7.2 x 1.7 มิลลิเมตร
คุณภาพข้าวสุก เหนียวนุ่ม มีกลิ่นหอม

ผลผลิต : ประมาณ 666 กิโลกรัมต่อไร่

ลักษณะเด่น : ให้ผลผลิตสูงและทนแล้งดีกว่าพันธุ์ข้าวเหนียวสันป่าตอง
ให้คุณภาพการหุงต้มดี มีกลิ่นหอม
ลำต้นแข็งปานกลาง
ต้านทานโรคใบจุดสีน้ำตาล
คุณภาพการสีดี

ข้อควรระวัง : ไม่ต้านทานโรคขอบใบแห้งและโรคใบไหม้
ไม่ต้านทานเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาลและแมลงบั่ว

พื้นที่แนะนำ : ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ขาวดอกมะลิ 105 (http://www.ricethailand.go.th/rkb/data_002/a1/rice_xx2-03_ricebreed_Khao_Dawk_Mali_105.html)

รูปที่ 2.7 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (http://www.ricethailand.go.th/rkb/data_002/a1/rice_xx2 03_ricebreed_Khao_Dawk_Mali_105.html)

ชื่อพันธุ์ : ขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L. var. Khao Dawk Mali 105)

ชนิด : ข้าวเจ้าหอม

ประวัติพันธุ์ : ได้มาโดยนายสุนทร สีหะเนิน เจ้าพนักงานข้าว รวบรวมจากอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา เมื่อพ.ศ. 2493-2494 จำนวน 199 รวงแล้วนำไปคัดเลือกแบบคัดพันธุ์บริสุทธิ์ (Pure Line Selection) และปลูกเปรียบเทียบพันธุ์ที่สถานีทดลองข้าวโคกสำโรงและปลูกเปรียบเทียบพันธุ์ท้องถิ่นในภาคเหนือ ภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จนได้สายพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 4-2-105 ซึ่งเลข 4 หมายถึงสถานที่เก็บรวงข้าวคืออำเภอบางคล้า เลข 2 คือ ขาวดอกมะลิ และเลข 105 หมายถึงแถวหรือรวงที่ 105 จากจำนวน 199 รวง

การรับรองพันธุ์ : คณะกรรมการพิจารณาพันธุ์ ให้ใช้ขยายพันธุ์เป็นพันธุ์รับรองเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2502

ลักษณะประจำพันธุ์ : เป็นข้าวเจ้าสูงประมาณ 140 เซนติเมตร

ไวต่อช่วงแสง

ลำต้นเขียวจาง ใบสีเขียวยาวค่อนข้างแคบ ฟางอ่อน ใบธงทำมุมกับคอรวง เมล็ดข้าวรูปร่างเรียวยาว

ข้าวเปลือกสีฟาง

เมล็ดข้าวกล้อง กว้าง x ยาว x หนา = 2.1 x 7.5 x 1.8 มิลลิเมตร

ปริมาณอมิโลส 12-17%
คุณภาพข้าวสุก นุ่ม มีกลิ่นหอม

ผลผลิต : ประมาณ 363 กิโลกรัมต่อไร่

ลักษณะเด่น : ทนแล้งได้ดีพอสมควร
เมล็ดข้าวสารใส แกร่ง คุณภาพการสีดี
คุณภาพการหุงต้มดี อ่อนนุ่ม มีกลิ่นหอม
ทนต่อสภาพดินเปรี้ยวและดินเค็ม

ข้อควรระวัง : ไม่ต้านทานโรคใบสีส้ม โรคขอบใบแห้ง โรคไหม้ และโรคใบหงิก
ไม่ต้านทานเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล เพลี้ยจักจั่นสีเขียว และหนอนกอ

พื้นที่แนะนำ : ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือตอนบน

2.3.5 ลักษณะของข้าวที่สำคัญทางการเกษตร

ลักษณะของข้าวที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร เป็นลักษณะที่เกี่ยวกับการเจริญเติบโตและการให้ผลิตผลสูงของต้นข้าวในท้องที่ที่ปลูก การทนต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงเสมอตลอดถึงคุณภาพของเมล็ดข้าว ฉะนั้น พันธุ์ข้าวที่ดีจะต้องมีลักษณะเหล่านี้ดี และเป็นที่ต้องการของชาวนาและตลาด (http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK3/chapter1/t3-1-l1.htm#sect5) ลักษณะที่สำคัญ มีดังนี้

1) ระยะพักตัวของเมล็ด (seed dormancy)

2) ความไวต่อช่วงแสง (sensitivity tophotoperiod)

2.1) ข้าวที่ไวต่อช่วงแสง ข้าวพวกนี้ออกดอกเฉพาะในเดือนที่มีกลางวันสั้น

2.2) ข้าวที่ไม่ไวต่อแสง การออกดอกของข้าวพวกนี้ไม่ขึ้นอยู่กับความยาวของกลางวัน

3) ความสามารถในการขึ้นน้ำและการทนน้ำลึก (floationg ability and tolerence to deep water)

4) คุณภาพของเมล็ด (grain quality) คุณภาพของเมล็ดแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ประกอบด้วยกัน คือ

4.1) คุณภาพเมล็ดทางกายภาพ หมายถึง ลักษณะรูปร่างและขนาดของเมล็ดที่มองเห็นได้

4.2) คุณภาพเมล็ดทางเคมี หมายถึง องค์ประกอบทางเคมีที่รวมกันเป็นเม็ดแป้งของข้าวที่หุงต้มเพื่อบริโภค

5) ลักษณะรูปต้น (plant type) พันธุ์ข้าวที่ให้ผลิตผลสูงจะต้องมีลักษณะรูปต้นที่สำคัญดังนี้

5.1) ใบมีสีเขียวแก่ ตรง ไม่โค้งงอ แผ่นใบไม่กว้างและไม่ยาวจนเกินไป ความสูงของต้นประมาณ 100-130 เซนติเมตร ความสูงของต้นเป็นระยะตั้งแต่พื้นดินถึงปลายของรวงที่สูงที่สุด

5.2) ลำต้นแข็ง ไม่ล้มง่าย

5.3) แตกกอมากและให้รวงมาก

6) ความต้านทานต่อโรคและแมลงศัตรูข้าว (resistance to diseases and insects)

2.4 กระดูกหมู

2.4.1 ประวัติการเลี้ยงหมู (สุกร)

เริ่มในยุค Neolithesage สุกรที่พบมีต้นกำเนิดมาจากสุกรป่ายุโรป มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Sus scrofa* และสุกรที่พบในแถบเอเชียอินเดีย มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Sus Vittatus* ชาติแรกที่นำมาเลี้ยงคือจีน เลี้ยงแบบปศุสัตว์เกือบ 5,000 ปี ก่อน คศ. 800 ปีก่อน ค.ศ. มีบันทึกว่าอังกฤษนำมาเลี้ยง แพร่ไปเขตอเมริกาโดยโคลัมบัส เข้าไปในช่วง ค.ศ. 1539 ไปสู่รัฐฟอริดา โดยชาวสเปนนำสุกรไปแพร่หลาย ไทยเริ่มเลี้ยงโดยชาวจีนที่อยู่ในไทย โดยเลี้ยงเพื่อเป็นอาหารและอาชีพเสริม เป็นสุกรพันธุ์พื้นเมืองของชาวจีนและไทย เช่นพันธุ์ไหหลำ ที่นำมาจากต่างประเทศ คือ พ.ศ. 2461 พันธุ์ Large Black, Essex จากประเทศอังกฤษ พ.ศ. 2482และ2492 พันธุ์ MidleWhite, Berkshire และ Worth จากยุโรปและอเมริกา (http://www.thaifeed.net/animal/swine/swine-1.html)

2.4.2 ประวัติการใช้กระดูกสัตว์

มนุษย์รู้จักการใช้ประโยชน์จากกระดูกสัตว์มากกว่า 2,650 ปี ก่อนคริสตกาลใช้ถ่านกระดูกเป็นสีย้อม สีทาผนังหลุมฝังศพของกษัตริย์อียิปต์ ระหว่างศตวรรษที่ 18 ราชวงศ์ในทิเบต ใช้ถ่านกระดูกบดผสมกับกาวทำเป็นสีทาบ้าน ในเวลาต่อมานำถ่านกระดูกมาผลิตยารักษาความเจ็บป่วย และรักษาโรค เช่น ยารักษาโรคลมบ้าหมู โรคระบาดในสัตว์ (anthrax) แผลเน่าเปื่อย และยาล้างปาก

ในปี1790 ใช้ถ่านกระดูกในการฟอกสียา ฟอกสีน้ำตาลในอุตสาหกรรม ฟอกสีไวน์ เวนิกาและเครื่องดื่ม นายปาเยนและลูกชาย และนายพลูวิเนท นำถ่านกระดูกมาฟอกสีน้ำตาลในอุตสาหกรรมเป็นครั้งแรก นอกจากนี้ชาวพื้นเมืองอเมริกัน ยังยังพบว่ากระดูกควายอเมริกันไบสัน มีประโยชน์มาก เป็นปุ๋ยอย่างดีสำหรับพืช

ในปี 1885-1889 มีการนำกระดูกควาย โดยเฉพาะตรงส่วนกระดูกสันหลังมาขายในเชิงพาณิชย์ ในหลายรัฐของสหรัฐอเมริกา ต่อมาช่วงปลายปี 1889 ถึงต้นปี 1890 กระดูกควายหายากขาดตลาด จึงมีการค้นหาใช้วัสดุอื่นทดแทนถ่านกระดูก เช่น หินฟอสเฟต indian burial grounds อย่างไรก็ตามไม่นิยมนำมาผลิตเป็นถ่านกระดูก (Ebonex, 2004 อ้างถึงใน สุดารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์, 2551)

2.4.3 องค์ประกอบของกระดูกสัตว์

จากข้อมูล ฝ่ายประมวลผลและสถิติ กองแผนงาน กรมปศุสัตว์ ข้อมูลจำนวนสุกรที่อนุญาตให้ฆ่าเป็นอาหาร เป็นรายเดือนปี พ.ศ. 2550 จะมีจำนวนที่ถูกฆ่า 5,929,032 ตัวต่อปี ดังนั้นมีปริมาณกระดูกเป็นจำนวนมากประมาณ 10,000-13,000 ตันต่อปี ดังตารางที่ 2.5

กระดูกสัตว์มีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์หรือไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภททาร์น้ำมันและไขมัน แคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมซัลเฟตและสารอื่นๆ อีกเล็กน้อย อัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca/P) เท่ากับ 1.67 (วรรณา โฆสิตะมงคล, 2538)

2.4.4 โครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

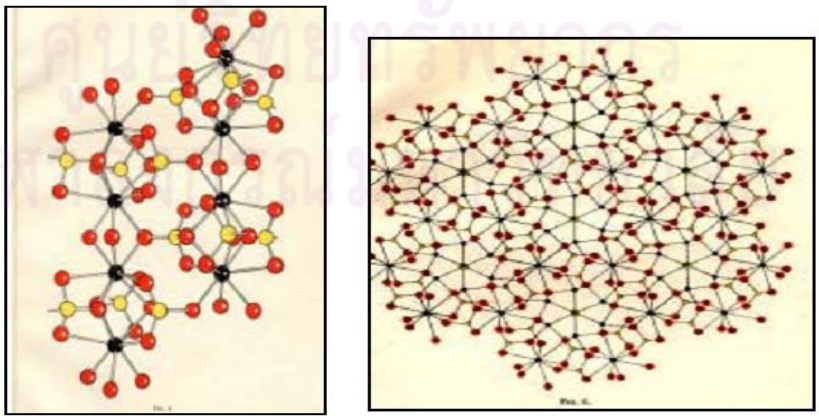
Beevers (1945) อ้างถึงใน สุดารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์ (2551) ได้ศึกษาโครงสร้างอะตอมของแร่ฟลูออโรอะพาไทต์เปรียบเทียบกับโครงสร้างอะตอมของฟันและวัสดุประเภทกระดูก โดยการวิเคราะห์ผลึกด้วยเอ็กซเรย์ (X-ray crystal analysis) พบว่ากระดูกมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ $Ca_5OH(PO_4)_3$ มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนัล (hexagonal) มีมิติของผลึกดังนี้คือ

ด้าน a และ ด้าน b เท่ากันยาว 9.4180 อังสตรอม ด้าน c ยาว 6.8840 อังสตรอม มุมของ ผลึกรูปหกเหลี่ยมคือ มุมอัลฟาและเบตามีขนาด 90 องศา มุมแกมมามีขนาด 120 องศา และมีโครงสร้างผลึกใกล้เคียงกันมากกับโครงสร้างผลึกแร่ฟลูออโรอะพาไทต์ (mineral fluor-apatite : $Ca_5F(PO_4)_3$ ซึ่งมีมิติของผลึกด้านทั้งสามดังนี้ ด้าน a และด้าน b เท่ากันยาว 9.4100

อังสตรอม ด้าน c ยาว 6.8800 อังสตรอม มีความสมมาตรของแกนตามแนวดิ่ง (vertical symmetry-axes) และตามแนว ที่ลากผ่านจุดกึ่งกลางของด้านหกเหลี่ยมอีกสี่ด้าน ดังรูปที่ 2.8

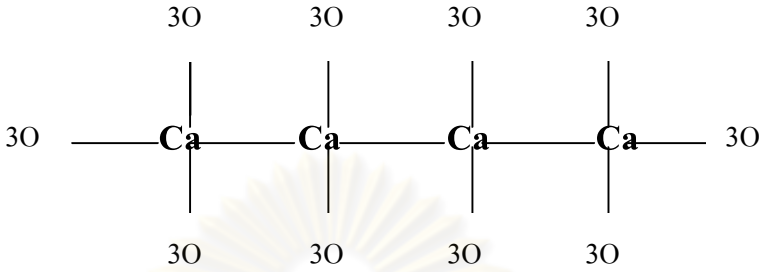
ตารางที่ 2.5 จำนวนสุกรที่อนุญาตให้ฆ่าเป็นอาหารแสดงเป็นรายเดือนปี พ.ศ. 2550 (กรมปศุสัตว์, 2550)

เดือน	**จำนวนสุกร**
มกราคม	470,813
กุมภาพันธ์	491,993
มีนาคม	496,159
เมษายน	494,785
พฤษภาคม	479,716
มิถุนายน	497,162
กรกฎาคม	525,825
สิงหาคม	509,023
กันยายน	520,328
ตุลาคม	484,299
พฤศจิกายน	488,934
ธันวาคม	469,996
รวม	5,929,032



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์
(http://www.admcintyre.pwp.blueyonder.co.uk อ้างถึงใน สุดารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์, 2551)

โครงสร้างของผลึกแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีอะตอมแคลเซียมแต่ละอะตอม จับกับ 9 อะตอมของออกซิเจนตามแนวระนาบ 3 อะตอม ข้างบน 3 อะตอม ข้างล่าง 3 อะตอมเขียนแทนการจัดเรียงอะตอมได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของผลึกแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

2.5 การบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)

2.5.1 คำจำกัดความของการบำบัดโดยใช้พืช

การบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation) มาจากคำราชาศัพท์คำว่า “Phyto” ในภาษากรีกที่ หมายถึง “พืช” รวมกับคำว่า “Remedium” ในภาษาลาติน หมายถึง “การแก้ไขหรือการปัดเป่าสิ่งชั่วร้าย” (Cunningham และคณะ, 1996) เมื่อนำทั้งสองคำนี้มารวมกัน หมายถึง การนำพืชมาใช้ในการบำบัดดิน กากตะกอน หรือน้ำ ที่เกิดการปนเปื้อนโดยสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ (International Environmental Technology Centre, 2000) ซึ่งการบำบัดนี้อาศัยประโยชน์จากกระบวนการดูดน้ำและแร่ธาตุอาหารผ่านทางรากของพืช และกระบวนการคายน้ำออกทางใบของพืชในการเปลี่ยนสารปนเปื้อนเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่ไม่มีความเป็นพิษหรือมีความเป็นพิษลดลง ซึ่งกลไกเหล่านี้ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ (เช่น น้ำมัน สารปราบศัตรูพืช เป็นต้น) หรือดูดซับและสะสมจุลธาตุที่เป็นพิษ ได้แก่ โลหะหนักต่าง ๆ เช่น ตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสีไว้ในลำต้น ซึ่งสารประกอบ หรือโลหะหนักเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากพื้นที่เมื่อมีการเก็บเกี่ยวพืชออกไป (Sustainable Strategies, 1997) บางครั้งอาจจะเรียกเทคโนโลยีการทำ Phytoremediation นี้ว่า botano-remediation, green remediation, Phytoremediation หรือ Phytoremediation technologies (McCutcheon และ Schnoor, 2003)

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักโดยพืช (อรรณพ หอมจันทร์, 2544)

1) ชนิดของโลหะหนัก

ชนิดของโลหะหนักนั้นมีส่วนสำคัญมากในการที่พืชจะดูดดึงโลหะหนักเหล่านี้ออกจากดิน เนื่องจากพืชนั้นมีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักในแต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน กล่าวคือ พืชจะดูดดึงโลหะหนักชนิดที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าโลหะหนักชนิดที่ส่งผลเป็นพิษต่อพืชเพียงอย่างเดียว

2) รูปทางเคมีของโลหะหนัก

การดูดดึงโลหะหนักโดยพืชนั้นส่วนใหญ่โลหะหนักในรูปเกลืออนินทรีย์ (Inorganic salt) ที่ละลายน้ำแล้วนั้นพืชจะสามารถดูดดึงเข้าไปได้มากกว่าโลหะหนักในรูปสารอินทรีย์ (organic compound)

3) ชนิดของพืช

พืชแต่ละชนิดก็จะมีลักษณะทางกายภาพที่ต่างกันเป็นผลทำให้ความสามารถของพืชในการดูดดึงโลหะหนักแต่ละชนิดแต่ละรูปก็แตกต่างกันไปด้วย ตัวอย่าง เช่น ในผักคะน้าจะมีความสามารถในการดูดดึง Zn ได้ดีที่สุดในรูป $ZnCl_2$

4) ลักษณะสมบัติบางประการของดิน

4.1) เนื้อดิน (soil texture) เนื้อดินที่แตกต่างกันก็ทำให้รากของพืชเข้าถึงและดูดดึงโลหะหนักได้ต่างกัน

4.2) การระบายน้ำ (drainage status) การที่ดินนั้นสามารถอุ้มน้ำไว้ได้มากก็จะทำให้โลหะหนักเหล่านั้นสามารถที่จะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ง่ายขึ้น พืชก็จะสามารถดูดดึงไปได้มากขึ้น

4.3) ความสามารถในการดูดจับโลหะหนักไว้ในดิน (sorptive capacity) หากว่าดินถูกจับโลหะหนักไว้อย่างแน่นหนาแล้วโอกาสที่พืชจะดูดดึงไปได้ย่อมลดลงไปด้วย ดังนั้นจึงมักพบว่าพืชสามารถดูดดึงและเคลื่อนย้ายโลหะหนักในดินทรายได้ดีกว่าในดินเหนียวอยู่เสมอ

5) สภาพแวดล้อมอื่น

5.1) อุณหภูมิ (tempcrature) อุณหภูมิมีผลต่อพืชมาก เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะพบว่าพืชจะดูดดึง Cd, Zn, Mn และ Fe จากดินสู่พืชมากขึ้น

5.2) ช่วงวัน (day length) ช่วงวันก็มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักของพืชเช่นกัน โดยที่ช่วงวันมากขึ้นพืชก็จะมีโอกาสในการสังเคราะห์แสงมากขึ้น ทำให้โอกาสที่พืชจะดูดดึงเอาโลหะหนักออกมาจากดินนั้นมีสูงขึ้นด้วย

5.3) ความเข้มแสง (intensity) ปริมาณของแสงก็มีส่วนในการดูดดึงโลหะหนักของพืชเช่นกัน เนื่องจากแสงที่มีความเข้มพอเหมาะพืชก็จะสามารถสังเคราะห์แสงได้ดี ทำให้การดูดดึงโลหะหนักที่อยู่ในดินก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

5.4) ความชื้นในดิน (soil moisture) ความชื้นของดินก็มีส่วนที่พืชจะดูดดึงโลหะหนักไปจากดิน โดยจะพิจารณาจากการ osmosis ซึ่งต้องมีความเหมาะสมของความชื้นในดิน พืชจึงจะดูดดึงสารต่าง ๆ ออกมาจากดินได้

5.5) ความชื้นในอากาศ (air humidity) ก็มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักในดินเช่นกัน เนื่องจากความชื้นในอากาศมีผลต่อการคายน้ำของพืช ถ้าพืชคายน้ำออกมาได้น้อย แรงดึงที่รากก็จะต่ำ ทำให้พืชดูดดึงสารต่าง ๆ ในดินได้น้อยลงเช่นกัน

2.6 การปนเปื้อนของแคดเมียมที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก (คนึงนิจ นิชานนท์ และ ฉันทนา ผดุงทศ, 2548)

3.6.1 การศึกษาการปนเปื้อนแคดเมียม

สืบเนื่องจากการเกิดโรคอิไต-อิไต (Itai Itai Disease) ในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีการค้นพบว่า สาเหตุมาจากการบริโภคข้าวที่ปนเปื้อนสารแคดเมียม เป็นเวลา 30 ปีขึ้นไป นักวิจัยต่างชาติ จากสถาบันจัดการคุณภาพน้ำ (International Water Management Institute - IWMI) จึงได้ร่วมกับนักวิชาการจากกรมวิชาการเกษตร (Department of Agriculture : DOA) ภายใต้โครงการความร่วมมือ IWMI - DOA Collaborative Project 1998-2003 ทำการตรวจวัดระดับสารแคดเมียมในดิน และข้าวบริเวณอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก รวมทั้งศึกษาแหล่งกำเนิดของสารแคดเมียมระหว่างปี พ.ศ. 2541-2546

ผลการศึกษาช่วงแรกระหว่างปี พ.ศ.2541-2543 ในแปลงนาบริเวณบ้านพะเด๊ะ ตำบลพระธาตุผาแดง ซึ่งอยู่ใกล้บริเวณแหล่งแร่สังกะสี ของอำเภอแม่สอด พบว่า มีปริมาณสารแคดเมียมในดิน (154 ตัวอย่าง) จำนวน 3.4-287 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานของสหภาพยุโรป (EU) กำหนดไว้ไม่เกิน 3 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม และพบว่า ร้อยละ 90 ของข้าวที่สุ่มตรวจ มีปริมาณแคดเมียม 0.1-4.4 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ซึ่งเปรียบเทียบกับบริเวณข้าวที่ปลูกในบริเวณอื่น มีปริมาณแคดเมียมเพียง 0.043 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ซึ่งปริมาณสารแคดเมียมที่พบนี้ มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับข้าวที่ก่อให้เกิดโรคอิไต-อิไต ในประเทศญี่ปุ่น หากบริโภคติดต่อกันเป็นเวลานาน

ผลการศึกษาช่วงที่สอง (ปี พ.ศ.2544-2546) ได้ขยายพื้นที่ศึกษาจากช่วงแรกมา ตามลำห้วย บริเวณตำบลพระธาตุผาแดง และตำบลแม่ตาว พบปริมาณแคดเมียมในดินมาก สูงกว่าค่ามาตรฐานของสหภาพยุโรป (EU) ถึง 72 เท่า (0.46-218 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม)

สำหรับผลการศึกษาถึงแหล่งกำเนิดของสารแคดเมียม นักวิจัยสรุปว่า น่าจะเกิดจากการที่ฝนตกชะหน้าดิน ที่อุดมด้วยแร่สังกะสี และแคดเมียม ลงสู่ต้นน้ำของลำน้ำธรรมชาติ ซึ่งก็คือ ห้วยแม่ตาวในกรณีนี้ ทำให้เกิดการสะสมในตะกอนท้องน้ำ เมื่อปล่อยน้ำเข้าสู่ในแปลงนา ตะกอนจะตกในแปลงต้นน้ำ และลดลงในแปลงต่อๆ ไป อย่างไรก็ตาม นักวิจัยสรุปว่า ไม่มีหลักฐานเพียงพอ ที่จะกล่าวว่า สารแคดเมียมมาจากเหมืองสังกะสี ที่เปิดทำการอยู่ในบริเวณที่พบการปนเปื้อนนี้

เนื่องจากนักวิจัยคาดการณ์ว่า ประชากรจำนวนประมาณ 6,000 คน ที่อาศัยใน 8 หมู่บ้าน ของตำบลพระธาตุผาแดง และตำบลแม่ตาว ของตำบลพระธาตุผาแดง และตำบลแม่ตาว บริโภคข้าวที่ปนเปื้อนเป็นระยะเวลานาน ทำให้เกิดการสะสมแคดเมียมในร่างกาย เป็นปริมาณมาก จนเกิดโรคอิไต-อิไต และภาวะการทำงานของไตผิดปกติได้ จึงได้ทำรายงานเสนอต่อกรมควบคุมมลพิษ เพื่อดำเนินการป้องกัน

2.6.2 การดำเนินงานแก้ไขที่ผ่านมา

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม ได้แต่งตั้งคณะทำงานเฉพาะกิจตรวจสอบ และแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของสารแคดเมียม ในอำเภอแม่สอด โดยมีปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมเป็นประธาน และมีหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเป็นคณะทำงาน ประกอบด้วย กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม สำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมมลพิษ กรมทรัพยากรน้ำ กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กรมทรัพยากรธรณี กรมวิชาการเกษตร การประมง กรมอนามัย กรมควบคุมโรค กรมอุตสาหกรรมพื้นฐาน และเหมืองแร่ สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 4 ผู้แทนจากจังหวัดตาก และผู้ทรงคุณวุฒิอีก 5 ท่าน มีกรมควบคุมมลพิษเป็นเลขานุการ คณะทำงานเฉพาะกิจนี้ มีหน้าที่รับผิดชอบในการกำหนดแผนงาน ประเมินขอบเขตพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน รวบรวม ตรวจสอบ วิเคราะห์ ประเมินผลกระทบ เสนอแนวทางและมาตรการแก้ไข กำกับ ติดตามประเมินผลการดำเนินการ เพื่อเสนอผลการดำเนินงาน ต่อรัฐมนตรีว่าการกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม

ภายใต้การดำเนินงานตามแผนปฏิบัติเร่งด่วน หน่วยเฉพาะกิจฯ ได้กำหนดวิธีการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ 2) เก็บตัวอย่างสิ่งแวดล้อม และตรวจวิเคราะห์ 3) การประเมินผล การตรวจสอบ และวิเคราะห์ผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย

ประชาชน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประกอบการประเมินความรุนแรง และเสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหาในขั้นต่อไป

1) การดำเนินงานด้านสุขภาพของกระทรวงสาธารณสุข

การดำเนินงานด้านสุขภาพของกระทรวงสาธารณสุข ในพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตากครั้งนี้ ถือเป็นการจัดการความเสี่ยงต่อสุขภาพอย่างครบวงจรโดยทั่วไปแล้ว การลดความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการสัมผัสมลพิษในสิ่งแวดล้อม จะมีประสิทธิภาพสูงสุด หากมีการชี้เป้าให้กับหน่วยงานด้านสุขภาพ ด้านการระบุพื้นที่ที่มีแนวโน้มสูง ต่อการปนเปื้อนมลพิษ รวมทั้งประชาชนที่อาศัยโดยรอบ ซึ่งมีโอกาสในการสัมผัสมลพิษค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามโดยส่วนมากแล้ว หน่วยงานด้านสุขภาพจะได้รับข้อมูลปัญหาก็ต่อเมื่อ เกิดการเจ็บป่วยของประชาชนผู้สัมผัสในพื้นที่แล้ว และอยู่ในขั้นที่ต้องการรักษาพยาบาล ซึ่งประสิทธิภาพในการลดความเสี่ยงมีเหลืออยู่น้อยมาก เทียบกับการลดความเสี่ยงในระยะต้นน้ำ หากทราบข้อมูลสิ่งแวดล้อมในเวลาที่เหมาะสม (ก่อนเกิดการเจ็บป่วย)

สำหรับกรณีปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียมที่แม่สอดนี้ กระทรวงสาธารณสุขไม่ได้รับทราบข้อมูลในระยะต้น ข้อมูลที่ได้รับเป็นการแจ้งเหตุโดยอาศัยความสัมพันธ์ส่วนตัว ระหว่างหน่วยงาน คือ การควบคุมมลพิษได้ประสาน กับสำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม เพื่อให้เข้ารับฟังการสรุปการวิจัยในพื้นที่ โดยนักวิชาการจากกรมวิชาการเกษตรและสถาบัน IWMI อันเป็นจุดเริ่มต้นของการดำเนินการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพที่ตามมา

เหตุการณ์นี้ได้สะท้อนให้เห็นความจำเป็นของกระทรวงสาธารณสุข ในการจัดระบบสำหรับหน่วยงานทุกระดับ ในการหาข่าว และแจ้งเหตุการปนเปื้อนสิ่งแวดล้อม อันอาจเกิดผลกระทบต่อสุขภาพ เช่นในกรณีแคดเมียมนี้ กระทรวงฯ ควรจะได้รับข้อมูลจากนักวิจัยขณะที่ทำการวิจัยในพื้นที่ (กรมวิชาการเกษตร และ International Water Management Institute - IWMI ระหว่าง พ.ศ. 2540-2546) ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ หากมีการทำงานอย่างมีส่วนร่วม และเชื่อมโยงกันระหว่างกระทรวงฯ หรือถ้าจะให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ในการลดความเสี่ยง กระทรวงฯ ควรได้รับข้อมูลแหล่งมลพิษ จากสำนักนโยบายและแผน กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม ซึ่งดูแลการทำการประเมินผลกระทบ ด้านสิ่งแวดล้อม ของผู้ประกอบการเหมือง และกรมอุตสาหกรรมพื้นฐาน และการเหมืองแร่ ซึ่งมีข้อมูลแหล่งแร่สังกะสี และแคดเมียม

2) การลงพื้นที่ เพื่อทำการประเมินความเสี่ยงอย่างรวดเร็ว

จากประสบการณ์การดำเนินงานจัดการปัญหาผลกระทบต่อสุขภาพ จากสิ่งแวดล้อมในพื้นที่อื่น เช่น กรณีสารตะกั่วที่กาญจนบุรี และกรณีโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ที่ลำปาง ทำให้นักวิชาการของสำนักโรคจากการประกอบอาชีพ และสิ่งแวดล้อม ตระหนักถึงการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม ตระหนักถึงความจำเป็นในการลงพื้นที่ เพื่อประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพอย่างรวดเร็ว เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง และทันกับความต้องการของสื่อมวลชน และประชาชนผู้ได้รับ

ผลกระทบ ดังนั้นภายหลังจากได้รับทราบข้อมูลเบื้องต้น จากกรมควบคุมมลพิษในเดือนธันวาคม 2546 ดังกล่าวมาแล้ว จึงได้วางแผนในการเก็บข้อมูล เพื่อประเมินความเสี่ยง

3) การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ ในภาพรวมทั้งอำเภอ สำหรับประชากรผู้มีโอกาสสัมผัสแคดเมียม

ผลการตรวจสุขภาพประชาชนกลุ่มเสี่ยงทั้งสิ้น 6,802 คน สรุปได้ว่า ร้อยละ 88 ของประชาชนกลุ่มเสี่ยงดังกล่าว มีระดับแคดเมียมในปัสสาวะไม่แตกต่างจากประชาชน ผู้ไม่สัมผัส (น้อยกว่า 5 ไมโครกรัมต่อกรัมครีตินิน) ขณะที่ร้อยละ 9 มีระดับแคดเมียมค่อนข้างสูง (5-10 ไมโครกรัมต่อกรัมครีตินิน) และอีกร้อยละ 3 ที่มีระดับแคดเมียมสูงมาก จนอาจเกิดพยาธิสภาพที่ไตได้ (มากกว่า 10 ไมโครกรัมต่อกรัมครีตินิน) ซึ่งผลการตรวจนี้ สอดคล้องกับผลการตรวจระดับแคดเมียมในดินและข้าว

4) ความร่วมมือทางวิชาการกับสถาบันการศึกษาในการวิจัยหาคำตอบด้านสุขภาพ

เนื่องจากประชาชนในพื้นที่เสี่ยงเหล่านี้ มีโอกาสที่จะเกิดภาวะพิษแคดเมียมเรื้อรังมากกว่า ภาวะพิษเฉียบพลัน ความสนใจในการประเมินผลต่อสุขภาพ ของกลุ่มเสี่ยงจึงมุ่งไปที่อวัยวะเป้าหมาย ได้แก่ ไต และกระดูก

การดำเนินการที่ผ่านมา ได้ทำการตรวจวิเคราะห์พยาธิสภาพของไตในเชิงลึก เพื่อประเมินว่า เกิดจากแคดเมียมหรือไม่ โดยการตรวจระดับโปรตีนโมเลกุลเล็ก ที่ออกมาจากท่อไต หากถูกทำลายโดยแคดเมียม สำหรับการตรวจพยาธิสภาพในกระดูกนั้น ต้องอาศัยเครื่องมือตรวจความหนาแน่นของกระดูก ที่จะสะท้อนภาวะกระดูกบางพรุน จากการสูญเสียแร่ธาตุทางท่อไต อนึ่ง การหาคำตอบด้านสุขภาพเหล่านี้ ล้วนแต่ต้องการการวิจัย ทำให้ต้องมีการปรึกษา หรือร่วมมือทางวิชาการ กับมหาวิทยาลัยหลายแห่ง ซึ่งสำนักโรคจากการประกอบอาชีพ ได้รับหน้าที่เป็นแกนกลางในการร่วมมือดังกล่าว

การแก้ไขปัญหาระยะยาว โดยองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ประชาคม หน่วยงานระดับจังหวัด และโดยรัฐบาล การดำเนินงานในพื้นที่อำเภอแม่สอดที่ผ่านมา ยังสะท้อนให้เห็นการทำงานร่วม ระหว่างทีมงานสาธารณสุข กับทีมงานสาขาอื่น ที่น่าจะเรียกได้ว่า เป็น All for Health กล่าวคือ ขณะที่ทีมงานสาธารณสุข ในพื้นที่กำลังเก็บตัวอย่างปัสสาวะ เพื่อทำการตรวจอยู่นั้น ก็ได้มีการประชุมปรึกษาหารือ กับผู้เกี่ยวข้องใน 2 ระดับ คือ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อบต.พระธาตุผาแดง) และหน่วยงานระดับจังหวัด ผู้ว่าราชการจังหวัดตาก

2.7 การดูดติดผิว (Adsorption) (ประรัชกรณ์ สาธิตคุณ, 2546)

การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวกับพื้นผิวสัมผัส กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว

ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ดูดติดเรียกว่า สารดูดติดผิว (adsorbent) สารที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่างๆ มาติดผิวได้ มีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1) ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (bone char) Activated Silica เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนสารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก แต่มีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด

2) ถ่านกัมมันต์ อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ได้ แต่เป็นสารดูดติดผิวที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตรต่อกรัม

3) ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งสารนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

2.7.1 กลไกการดูดติดผิว

เนื่องจากการดูดติดผิวเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวและของแข็ง หรือก๊าซและของแข็ง ซึ่งปรากฏการณ์นี้มีขั้นตอนการเกิดขึ้น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 Bulk solution transport สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่จากสารละลายสู่ด้านนอกของน้ำที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิว การเคลื่อนที่เกิดขึ้นโดยการแพร่

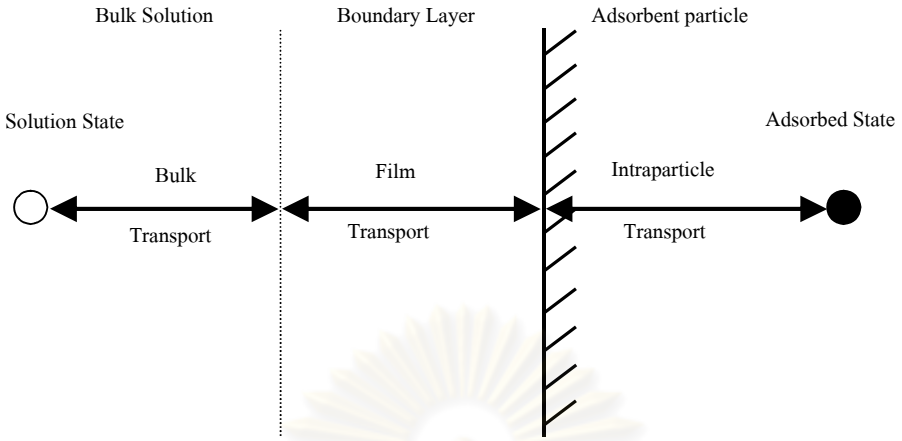
ขั้นตอนที่ 2 Film diffusion transport โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะแพร่ผ่านชั้นน้ำ (hydrodynamic boundary layer) ที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิวเมื่อน้ำเคลื่อนที่ผ่านสารดูดติดผิว ระยะทางในการเคลื่อนที่และเวลาที่เกิดขึ้นของขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับอัตราไหล ถ้าอัตราไหลสูง ระยะทางสั้น

ขั้นตอนที่ 3 Pore transport หลังจากเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำ สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่ผ่านช่องที่อยู่ภายในสารดูดติดผิวไปสู่บริเวณที่จะเกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 Adsorption หลังจากมีการเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่จะมีการดูดซับเกิดขึ้นและถูกดูดติดผิวทางกายภาพ

ขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุด เรียกว่า rate-limiting step ซึ่งจะควบคุมอัตราการกำจัดในถังปฏิกรณ์ที่มีความปั่นป่วนสูง film diffusion และ pore diffusion จะควบคุมอัตราการกำจัด film diffusion จะควบคุมในขั้นต้น หลังจากนั้นเมื่อมีการสะสมของสารดูดติดผิวในช่องภายในสารดูดติดผิว pore diffusion จะควบคุมอัตราการกำจัด

ขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมด ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดติดผิว
(Eckenfelder, 1966 อ้างถึงใน ประรัชกรณ์ สาธิตคุณ, 2546)

2.7.2 ประเภทของการดูดติดผิว

การดูดติดผิวแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (physical adsorption) ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่าง 2 โมเลกุล และการดูดติดผิวทางเคมี (chemisorption) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดพันธะทางเคมีระหว่าง 2 โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวกับผิวหน้าของสารดูดติดผิว

ข้อแตกต่างของการดูดติดผิวทางกายภาพที่แตกต่างจากการดูดติดผิวทางเคมี มีดังต่อไปนี้

1) การดูดติดผิวทางกายภาพ ไม่เกี่ยวข้องกับการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน การดูดติดผิวทางกายภาพสามารถย้อนกลับได้ สารถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ออกจากสารดูดซับ (desorption) ที่อุณหภูมิเดียวกัน ส่วนการดูดติดผิวทางเคมีเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นผันกลับไม่ได้

2) การดูดติดผิวทางกายภาพ ไม่มีความจำเพาะกับบริเวณโมเลกุลของสารดูดติดผิวสามารถดูดติดผิวได้ทั่วบริเวณผิวหน้าของสารดูดติดผิว ในทางด้านตรงกันข้าม การดูดติดผิวทางเคมีมีความจำเพาะกับบริเวณที่สามารถดูดติดผิวได้

3) ความร้อนในการดูดติดผิวทางกายภาพน้อยกว่าการดูดติดผิวทางเคมี ความร้อนในการดูดติดผิวทางกายภาพประมาณ 20 กิโลแคลอรีต่อโมล สำหรับการดูดติดผิวที่มีโพรงภายในขนาดเล็ก ส่วนความร้อนของการดูดติดผิวทางเคมีอยู่ในช่วง 20-100 กิโลแคลอรีต่อโมล

2.7.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว

1) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดติดผิวอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนของระบบต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดติดผิวจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดติดผิว ดังนั้นการแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิวในทางตรงกันข้ามถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ความปั่นป่วนในถังดูดติดผิว คือความเร็วของน้ำที่ผ่านถังต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีแล้วถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว ความสามารถในการดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ สารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าสาร ดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวน้อย ส่วนอัตราการดูดติดผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว เช่น คาร์บอนผง มีอัตราเร็วในการดูดติดสูงกว่าคาร์บอนแบบเกล็ด

3) ขนาดและลักษณะของสารถูกดูดติดผิว ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลายในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยจะสามารถดูดติดผิวได้ดี นอกจากนี้ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสัมพันธ์กับการดูดติดผิวซึ่งถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกแล้ว ความสามารถในการดูดติดผิวจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดติดผิว นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง

4) พีเอช มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการดูดติดผิวด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถจะเกาะติดผิวของสารดูดติดผิวได้ดี

5) อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคืออัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิและลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบ Exothermic

6) เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิวและอายุการใช้งานของถังดูดติดผิว โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดติดผิวเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้วก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวเลย

2.7.4 สมดุลของการดูดติดผิว (Adsorption Equilibrium)

การดูดติดผิวในสารละลายมีผลต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายหรือตัวถูกดูดติดผิวบนผิวของสารดูดติดผิว ตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวมีแนวโน้มที่จะหลุดออกสู่สารละลาย เมื่อปริมาณของการดูดติดผิวและหลุดออกจากผิวมีจำนวนเท่ากัน อัตราการดูดติดผิวและการหลุดออกจะเข้าสู่สภาวะคงที่ (Equilibrium state) หรือเรียกว่า สมดุลของการดูดติดผิว (Adsorption Equilibria) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกดูดติดผิวในสารละลาย สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยของสารดูดติดผิวซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm)

ระบบการดูดติดได้ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ในรูปของสมการอย่างง่ายแล้วนำสมการมาวาดกราฟเพื่อสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆได้ ซึ่งจะเป็นแนวทางนำมาใช้ในการคำนวณออกแบบระบบดูดติด โดยมีผู้เขียนสมการเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายลักษณะข้อมูลของการดูดติดไว้หลายประการ แต่ที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ Freundlich Adsorption Isotherm และ Langmuir Adsorption Isotherm

1) Freundlich Adsorption Isotherm

Freundlich Adsorption Isotherm จัดเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้กันมากสมการหนึ่ง ในการอธิบายการดูดติดในระบบของเหลว

สำหรับสมการของ Freundlich สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.1

$$\frac{X}{m} = KC_e^{1/n} \qquad (2.1)$$

โดยที่

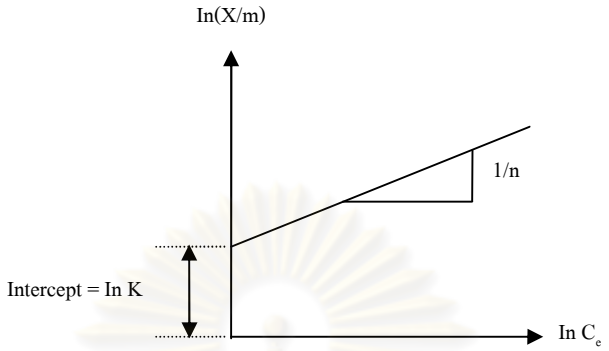
X/m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนัก; มิลลิกรัมต่อกรัม

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล; มิลลิกรัมต่อลิตร

K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว; ลิตรต่อกรัม

1/n = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดติดผิว

จากสมการที่ (2.1) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง In(X/m) และ InC_e จะได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Freundlich

จากรูปที่ 2.11 ค่าความชันของกราฟเท่ากับ 1/n และจุดตัดแกน y เท่ากับ InK สำหรับการดูดติดของสารอินทรีย์บนผิวของสารดูดติดส่วนใหญ่จะมีค่า 1/n ต่ำกว่า 1 กราฟที่มีค่าความชันสูง คือ มีค่า 1/n เข้าใกล้ 1 นี้จะพบว่า ความสามารถของการดูดติดที่ความเข้มข้นของสารละลายสูงๆ จะมีค่ามากและความสามารถนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของสารละลายนี้มีค่าต่ำลง และในกรณีที่กราฟมีค่าความชันน้อยๆ ค่า 1/n จะน้อยกว่า 1 มากๆ ก็จะพบว่าความสามารถในการดูดติดนี้จะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายให้ต่ำลง จากสมการของ Freundlich นี้ได้บ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดติดของสารดูดติด หรือค่า (X/m) จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายในของเหลว ดังนั้นค่าความสามารถในการดูดติดจึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่สมดุลมีค่าสูงขึ้นด้วย

สมการของ Freundlich นี้ยังสามารถใช้ในการคำนวณหาปริมาณของสารดูดติดที่ต้องการใช้ในการลดค่าความเข้มข้นของสารละลายในของเหลว แทนค่า X ในสมการที่ 2.1 ด้วยค่า $(C_o - C_e)$ โดยที่ค่า C_o คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายในของเหลว จะได้ค่าดังสมการที่ 2.2

$$\text{In}\left(\frac{C_o - C_e}{m}\right) = \text{In}\frac{K}{n} + \text{In}\, C_e \qquad (2.2)$$

สมการที่ 2.2 นี้มีประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้เปรียบเทียบค่าความสามารถในการกำจัดสารต่างๆ ของสารดูดติดทั้งที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน

2) Langmuir Adsorption Isotherm

Langmuir Adsorption Isotherm บางครั้งเรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model มีสมมติฐานที่สำคัญ ดังนี้

- มีพื้นที่สำหรับการดูดติดจำกัด โมเลกุลที่ถูกดูดติดที่ผิวของสารดูดติดจะอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน
- แต่ละตำแหน่งที่ถูกดูดติดผิวจะมีเพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น หรือกล่าวได้ว่ามีการดูดติดเพียงชั้นเดียว
- ตรงบริเวณดูดติดผิวจะเกิดอัตราการดูดติด และการคายสารออก ซึ่งอัตราการดูดติดมีมากกว่าอัตราการคายสารออกจนกระทั่งถึงสภาวะสมดุล (อัตราการดูดติดเท่ากับการคายสารออก) พลังงานในการดูดติดมีค่าเท่ากันในทุกๆตำแหน่ง

นอกจากนี้โมเลกุลที่ถูกดูดติดไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาได้อย่างอิสระระหว่างพื้นที่ผิวหรือทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นที่อยู่ใกล้ได้

สำหรับสมการ Langmuir สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.3

$$X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e} \qquad (2.3)$$

โดยที่

X = X/m, ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของสารตัวกลาง; มิลลิกรัมต่อกรัม

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดติดเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว; มิลลิกรัมต่อกรัม

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล; มิลลิกรัมต่อลิตร

b = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดติด; ลิตรต่อมิลลิกรัม

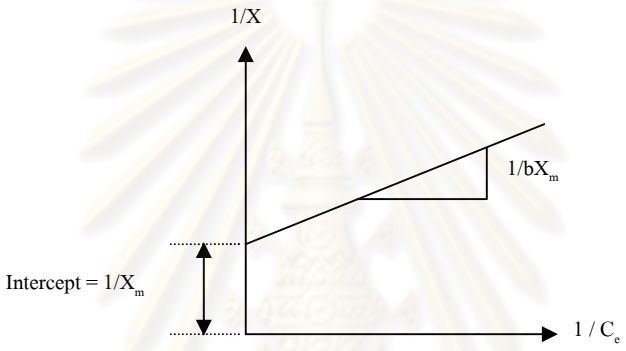
เมื่อ X เข้าสู่ X_m และ C_e เข้าสู่ α จากสมการสามารถเขียนได้เป็น

$$C_e / X = \frac{1}{bX_m} + \frac{C_e}{X_m} \qquad (2.4)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/X กับ C_e จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน $1/X_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bX_m$ และเมื่อหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรง

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{bX_mC_e} \quad (2.5)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/X$ และ$1/C_e$ ได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ Langmuir

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sripachote (2007) ศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของแคดเมียมและสังกะสีในดินที่ปนเปื้อนที่หมู่บ้านพะเด๊ะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นดินร่วนเหนียวปนทรายตลอดความลึก ยกเว้น 0-20 เซนติเมตรของพื้นที่ลุ่มจะเป็นดินร่วนเหนียวและดินร่วน ค่าพีเอชในดินอยู่ในช่วง 5.35-8.22 จะมีค่าคงที่หรือลดลงตามความลึก ส่วนค่าอินทรียวัตถุอยู่ในช่วง 1.5-4.9% และค่า CEC อยู่ในช่วง 9.7-20 $cmol(+)kg^{-1}$ ค่าอินทรียวัตถุและ CEC มีแนวโน้มลดลงตามความลึก ปริมาณของแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในพื้นที่ลุ่มและพื้นที่สูงชุ่มน้ำมีค่าสูงกว่ามาตรฐานของ EU ในขณะที่พื้นที่อื่นจะมีค่าต่ำกว่า การกระจายตัวนี้จะลดลงตามความลึก ค่าเฉลี่ยบริเวณผิวดินจากพื้นที่อื่น ในพื้นที่ลุ่มจะเท่ากับ 27 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัม และ 550 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกิโลกรัม ในพื้นที่สูงชุ่มน้ำจะเท่ากับ 23 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัม และ 536 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกิโลกรัม

Chanthachot และคณะ (2005) ศึกษาโลหะหนัก คือ สารหนู แมงกานีส แคดเมียม สแกนเดียม ทอเรียม โครเมียม สังกะสี โคบอลต์ ซีเรียม และเหล็กในดินบริเวณแม่น้ำแม่ตาว จังหวัดตาก อธิบายโดยใช้ Instrumental Neutron Activation Analysis เก็บตัวอย่างจาก 12 พื้นที่ ระหว่าง 15-19 พฤศจิกายน 2004 พบว่า สารหนู แคดเมียม โครเมียม โคบอลต์ ทอเรียม สแกนเดียม และซีเรียม อยู่ในช่วง 4-92 ไมโครกรัมต่อกรัม ส่วนแมงกานีส อยู่ในช่วง 100-1,052 ไมโครกรัมต่อกรัม สังกะสีอยู่ในช่วง <25-1,652 ไมโครกรัมต่อกรัมและเหล็กอยู่ในช่วง 10,300-25,100 ไมโครกรัมต่อกรัม จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของแคดเมียม สังกะสีและสารหนู สูงกว่าระดับค่ามาตรฐานสูงสุดที่ยอมรับได้ของ EU ของดินที่ทำการเกษตร

Somboon (1999) ศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของแคดเมียมและสังกะสีในดินจากกิจกรรมทำเหมืองสังกะสี: กรณีศึกษาเหมืองสังกะสี อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก การทำเหมืองสังกะสีทำให้เกิดแคดเมียมและสังกะสีกระจายในบริเวณลุ่มน้ำ โดยเฉพาะพื้นที่ที่อยู่ท้ายน้ำ จากผลการศึกษาจะมี 2 ทางเลือกในการจัดการปัญหาดินปนเปื้อนคือ1) การจัดการพื้นที่และน้ำที่เกิดจากกิจกรรมของการทำเหมือง โดยการควบคุมโครงสร้าง มีการกักเก็บแร่และตรวจสอบพื้นที่ไม่ให้เกิดการชะลงมาเมื่อเกิดฝนตก 2) การบำบัดดินที่ปนเปื้อน ในพื้นที่ไม่ได้ทำการเพาะปลูกทำได้โดยเพิ่มพีเอชในดิน ส่วนในพื้นที่เพาะปลูกควรมีการเติมอินทรียวัตถุเพื่อลดการละลายของแคดเมียมและสังกะสีหรือไม่ควรเพาะปลูกพืชที่กินได้

Green และคณะ (2002) ศึกษาการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีในข้าว โดยทดลองในสารละลายที่เป็น chelator-buffer เพื่อควบคุมกิจกรรมของแคดเมียมและสังกะสี พบว่า ความเป็นพิษของสังกะสีต่อพืชจะขัดขวางการดูดดึงแคดเมียม ทำให้แคดเมียมเคลื่อนย้ายไปที่ลำต้นของข้าวลดลง

Hutchinson และคณะ (2000) ศึกษาเปรียบเทียบการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีของ *Thlaspi caerulescens* และ *Bladder campion* ในสารละลายพบว่า *Thlaspi caerulescens* ดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีได้ปริมาณสูง โดยสามารถสะสมแคดเมียมและสังกะสีในลำต้นมีปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 1,270 และ 32,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

Asami (1997) รายงานระดับของแคดเมียมที่ยอมรับให้มีได้ในเมล็ดข้าวและในดินในประเทศญี่ปุ่นและจีน คือ 1.0 และ 0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และกำหนดปริมาณความเข้มข้นของทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี ในดินที่มีน้ำขังของญี่ปุ่น คือ 125, 100, 400 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

Huang และ Cunningham (1996) ศึกษาการดูดดึงโลหะของพืชตระกูลกะหล่ำ (*Brassica*) และข้าวโพด โดยปลูกในสารละลายและในดินที่มีการปนเปื้อนของตะกั่ว พบว่า ข้าวโพดและกะหล่ำดูดดึงตะกั่ว เท่ากับ 375 และ 225 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

Chen (1992) ศึกษาการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนักในเมล็ดและรากของข้าวจากแหล่งต่าง ๆ ในประเทศญี่ปุ่นที่มีการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนักมากน้อยแตกต่างกัน พบว่าความเข้มข้นสูงสุดของสารหนู ทองแดง แคดเมียม สารปรอท ตะกั่ว และสังกะสี ในเมล็ดข้าวมีค่าเท่ากับ 0.29, 6.0, 5.2, 0.26, 1.0 และ 60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และความเข้มข้นสูงสุดของสารหนู แคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในรากข้าว เท่ากับ 1,182, 97, 560 และ 4,510 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งความเข้มข้นของธาตุโลหะหนักในข้าวขึ้นอยู่กับปริมาณการปนเปื้อนและแหล่งของการปนเปื้อน

Chan-Jun และ Jung-hoen (2005) ได้ศึกษาการกำจัดไอออนแคดเมียม(Cd^{+2}) ตะกั่ว (Pb^{+2}) ทองแดง (Cu^{+2}) และแมงกานีส (Mn^{+2}) ด้วยสารดูดติดผิว เคริดแลน (curdlan) ผสมกับถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายของกรดและด่าง และควบคุมขนาดโพรงของสารดูดติดผิวให้อยู่ในช่วงที่ต้องการพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของแคดเมียม ตะกั่ว ทองแดง และแมงกานีสเป็น 41, 72, 161 และ75 มิลลิกรัมต่อกรัมของสารดูดติดผิว ตามลำดับ ผลจากการวิจัยนี้ สรุปว่าสามารถพัฒนาสารดูดติดผิวในการกำจัดไอออนของโลหะหนักในพืชสมุนไพร (oriental herbs) ที่ใช้ในการผลิตยาพื้นบ้าน (traditional oriental medicine)

Min และคณะ (2004) ได้ศึกษาการใช้เส้นใยของพืชจำพวกสน (juniper fiber)ในการกำจัดแคดเมียมไอออนในน้ำโดยกระตุ้นสารดูดติดผิวด้วยสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมล์ พบว่ากลุ่มสารคาร์บอกซิเลท ไอออนมีผลต่อการกำจัดแคดเมียม ไอออน การกระตุ้นด้วยด่างทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง แต่เกิด pseudo-second-order kinetic model ที่เหมาะสมกับการดูดติดผิวแคดเมียม ไอออน ความสามารถในการดูดติดผิวแคดเมียม ไอออนเพิ่มขึ้นและแข็งแรง โดยสามารถกำจัดแคดเมียม ไอออนเพิ่มขึ้น 9.18-29.54 มิลลิกรัมต่อกรัม สามารถถึงสภาวะสมดุลเร็วขึ้นที่ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมในน้ำที่เกิดจากพายุฝน (storm water runoff) การทดลองแบบแบตช์ไอโซเทอมการดูดติดผิวเป็นแบบแลงเมียร์มากกว่าแบบฟรุนดลิช

Cheung และคณะ (2001) ได้ศึกษาสมดุลของการดูดติดผิวและจลศาสตร์ของแคดเมียมไอออนในสารละลายโดยใช้ถ่านกระดูก พบว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิวเป็นแบบแลงเมียร์และไบ-แลงเมียร์ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาอธิบายกลไกการดูดติดผิวและจลศาสตร์ของแคดเมียมไอออนบนถ่าน

กระดูก กลไกที่เกี่ยวข้องคือการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การดูดติดผิวทางกายภาพ (physical adsorption) บนผิวที่ต่างกัน ดังนั้นจึงเอาโมเดลไบ-แลงเมียร์มาอธิบายจะเหมาะสมกว่า อัตราการกำจัดไอออนแคดเมียมขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมและปริมาณถ่านกระดูกที่ใช้

Kadirvelu และคณะ (2001) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนัก ทองแดง ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม และนิกเกิล ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกาบมะพร้าวที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง ปรอท ตะกั่ว แคดเมียมและนิกเกิล ได้ ร้อยละ 73, 100, 100, 100 และ 92 ที่พีเอช 5.0, 3.5, 4.0, 4.0 และ 3.3 ตามลำดับ

Azab และ Peterson (1989) ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมโดยใช้สารดูดติดผิวทางชีวภาพชนิดต่าง ๆ รวมทั้งกระดูกสัตว์ โดยใช้สารละลายแคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุสารดูดติดผิวแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส พบว่ากระดูกสัตว์สามารถกำจัดแคดเมียมได้มากกว่าร้อยละ 90 ที่ พีเอช 5.2

สุดารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์ (2551) ศึกษาการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมด้วยสารดูดซับจากกระดูกหมู การทดลองประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายตะกั่วและแคดเมียมแบบแบตช์ พบว่า ถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ 1,829 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน และสามารถกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 99 รองลงไปเป็นถ่านกัมมันต์และผงกระดูก สำหรับการกำจัดแคดเมียม ผงกระดูกให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด 383 มิลลิกรัมต่อกรัมกระดูก ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดแคดเมียมได้ร้อยละ 85 รองลงไปเป็นถ่านกัมมันต์และถ่านกระดูก ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของผงกระดูกเป็นแบบฟรุนดลิชถ่านกระดูกเป็นแบบแลงเมียร์ ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมของผงกระดูกเป็นแบบแลงเมียร์

จักรพงษ์ แสนชัย (2548) ได้ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยเกลือสังกะสี (ซิงค์คลอไรด์) ในการกำจัดสารตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าถ่านกระดูกที่คาร์บอไนซ์ที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงและผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ มีคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น พื้นที่ผิว ขนาดและปริมาตรของโพรงแตกต่างจากถ่านกระดูกที่ไม่ผ่านการกระตุ้น ทั้งประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณสารตะกั่วเพิ่มขึ้นประมาณ 1 เท่า แต่ประสิทธิภาพการกำจัดสารแคดเมียมลดลงประมาณ 3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกระดูกที่ไม่ผ่านการกระตุ้น

สุชาดา สุทธิพิบูลย์ (2547) ศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้ถ่านกระดูกเผาที่ 900 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงและกระตุ้นด้วยกรดและด่าง 0.1 โมลาร์ พบว่าการกระตุ้นถ่านกระดูกด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารตะกั่วจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่งตะกั่วได้ดีกว่าถ่านกระดูกที่กระตุ้นด้วยกรด โดยสามารถกำจัดตะกั่วได้ 401.65 มิลลิกรัม ต่อ 1 กรัมของถ่านกระดูกที่พีเอช 6 สำหรับไอโซเทอมในการดูดซับตะกั่วเป็นแบบฟรุนดลิชและแลงเมียร์

ศุภกิจ พัฒนเตชะ (2545) ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกวัวกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานโดยการทดลองแบบแบตช์และแบบคอลัมน์ ผลการทดลองแบบแบตช์พบว่าการกำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดเมื่อเผากระดูกที่ 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่พีเอชเท่ากับ 4 มีประสิทธิภาพการดูดซับ 100% ที่ความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการกำจัดแคดเมียม ใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถกำจัดได้ 100% ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 6 และเมื่อความเข้มข้นเป็น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดแคดเมียมได้ร้อยละ 98.95 ที่พีเอช 6 ค่าไอโซเทอม 68 มิลลิกรัมต่อกรัมของกระดูก เวลาที่เหมาะสมคือ 48 ชั่วโมง เมื่อคาร์บอไนซ์ที่ 400 องศาเซลเซียสที่ความเข้มข้นแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5 สามารถกำจัดแคดเมียมได้ร้อยละ 100

อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ (2544) ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกวัวกำจัดตะกั่วแคดเมียม และโครเมียม โดยเผาที่อุณหภูมิ 600, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส นาน 8, 10 และ 12 ชั่วโมง โดยการทดลองแบบแบตช์ แบบคอลัมน์ เพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกระดูก และหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะทั้ง 3 ชนิด ได้ผลสรุปว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมถ่านกระดูกคือ 600 องศาเซลเซียส โดยเวลาในการเผา ไม่มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะ สามารถกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นสูงสุด 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเป็น 5 สามารถกำจัดตะกั่วได้ 458.55 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดูก ส่วนแคดเมียมความเข้มข้นของสารละลาย 40 มิลลิกรัมที่พีเอชเป็น 6 สามารถกำจัดแคดเมียมได้ 29.80 มิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านกระดูก ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วเป็นแบบฟรุนดลิช ส่วนไอโซเทอมการดูดซับของแคดเมียมเป็นแบบแลงเมียร์ การทดลองแบบคอลัมน์พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมที่ความเข้มข้น 10 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
2. Scanning Electron Microscope (SEM)
3. X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)
4. Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)
5. Brunauer-Emmett-Teller (BET)
6. ตู้อบ (Oven)
7. โถดูดความชื้น (Desiccater)
8. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
9. เครื่องชั่งละเอียด (4 ตำแหน่ง)
10. เตาแผ่นความร้อน (Hot plate)
11. เครื่องบดอย่างหยาบ (Wood chopper)
12. เครื่องเขย่า (Shaker)
13. กระดาษกรอง (Whatman no. 42)
14. เครื่องแก้ว
    - 14.1 บีกเกอร์
    - 14.2 กระบอกตวง
    - 14.3 ขวดรูปชมพู่
    - 14.4 ขวดแก้ววัดปริมาตร
    - 14.5 หน้าปัดนาฬิกา
    - 14.6 ปิเปต
15. ตะแกรงร่อนขนาด 325 เมช , 2 มิลลิเมตร และ 0.5 มิลลิเมตร
16. เมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6
17. กระดูกหมูสด
18. ดินบริเวณบ่อตาโล่ อำเภอวังน้อย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

19. กระถางพลาสติก (กว้าง 12 นิ้ว ลึก 9 นิ้ว)
20. ถุงพลาสติก
21. กรรไกร
22. มีด
23. พลั่ว
24. ถุงมือ
25. ฟอยล์อลูมิเนียม

3.1.2 สารเคมี

1. แคดเมียมไนเตรท ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$)
2. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
3. กรดไนตริก (HNO_3)
4. สารละลายมาตรฐานแคดเมียม

3.2 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

3.2.1 หน่วยวิจัยการจัดการกากอุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการกำจัดขยะ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- เตรียมผงกระดูกหมู
- ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของผงกระดูกหมู

3.2.2 ดาดฟ้าตึก 4 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- เตรียมดิน
- เตรียมเพาะกล้าพันธุ์ข้าว
- ทำการปลูกข้าวสองสายพันธุ์ในกระถางทดลอง

3.2.3 ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

- ศึกษาลักษณะพื้นผิวและโพรงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
- ศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)
- การหาหมู่ฟังก์ชันนอลกรุ๊ปด้วยเครื่อง Fourier Transforms Infrared Spectrometer (FTIR)

3.2.4 วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรทั้งหมดของโพรงและขนาดโพรงด้วยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller (BET)
- การบดกระดูกหมูให้ได้ขนาด 325 เมช

3.3 ขั้นตอนงานวิจัย

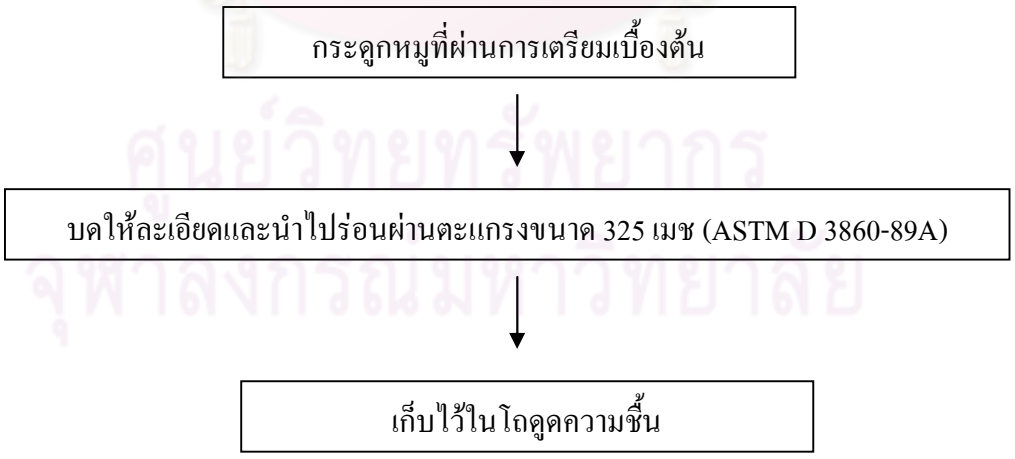
3.3.1 การเตรียมกระดูกหมู

นำกระดูกหมูสดไปต้มเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำมาล้างทำความสะอาดและกำจัดกลิ่นด้วยน้ำเกลือ เมื่อล้างสะอาดแล้วนำไปผึ่งแดดเป็นเวลา 2 สัปดาห์ แล้วนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง จะได้กระดูกหมูที่สามารถใช้ในการทดลอง

3.3.2 การเตรียมผงกระดูกหมู

นำกระดูกหมูที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.1 มาบดด้วยเครื่องบด จะได้กระดูกที่มีขนาดเล็กลง จากนั้นบดละเอียดด้วยเครื่องปั่น นำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช หรือ 45 ไมโครเมตร แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น ดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 การเตรียมกระดูกหมู



รูปที่ 3.1 การเตรียมผงกระดูกหมู

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.3 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของผงกระดูก

ลักษณะทางกายภาพของกระดูกหมู ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของโพรงและปริมาตรทั้งหมดของโพรง โครงสร้างผลึก สมบัติทางเคมี ได้แก่ องค์ประกอบของสารอินทรีย์ วิธีวิเคราะห์สมบัติต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีวิเคราะห์สมบัติต่างๆของกระดูกหมู

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์หรือเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ
โครงสร้างผลึก	X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)
องค์ประกอบสารอินทรีย์	Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)
โครงสร้างพื้นผิว	Scanning Electron Microscope (SEM)
พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของโพรงและปริมาตรทั้งหมดของโพรง	Brunauer-Emmett-Teller (BET)

3.3.4 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของผงกระดูกหมู

1) การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของแคดเมียม

นำสารละลายมาตรฐานแคดเมียมไนเตรทที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมเป็น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เจือจางให้เป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สารละลายมาตรฐาน 100 มิลลิลิตรผสมกับกรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวม 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายแคดเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งได้ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

2) การทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมของผงกระดูกหมู

2.1) การทดลองหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของผงกระดูกหมูในการกำจัดแคดเมียม (รูปที่ 3.2)

ชั่งผงกระดูกหมูปริมาณ 0.02 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร ใส่น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่พีเอช 5 เขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำในแต่ละช่วงเวลาคือ 30 นาที 1, 4, 8, 24, 36, 48 และ 72 ชั่วโมง นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman no. 42 (0.45 ไมครอน) จากนั้นนำไปหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง AAS

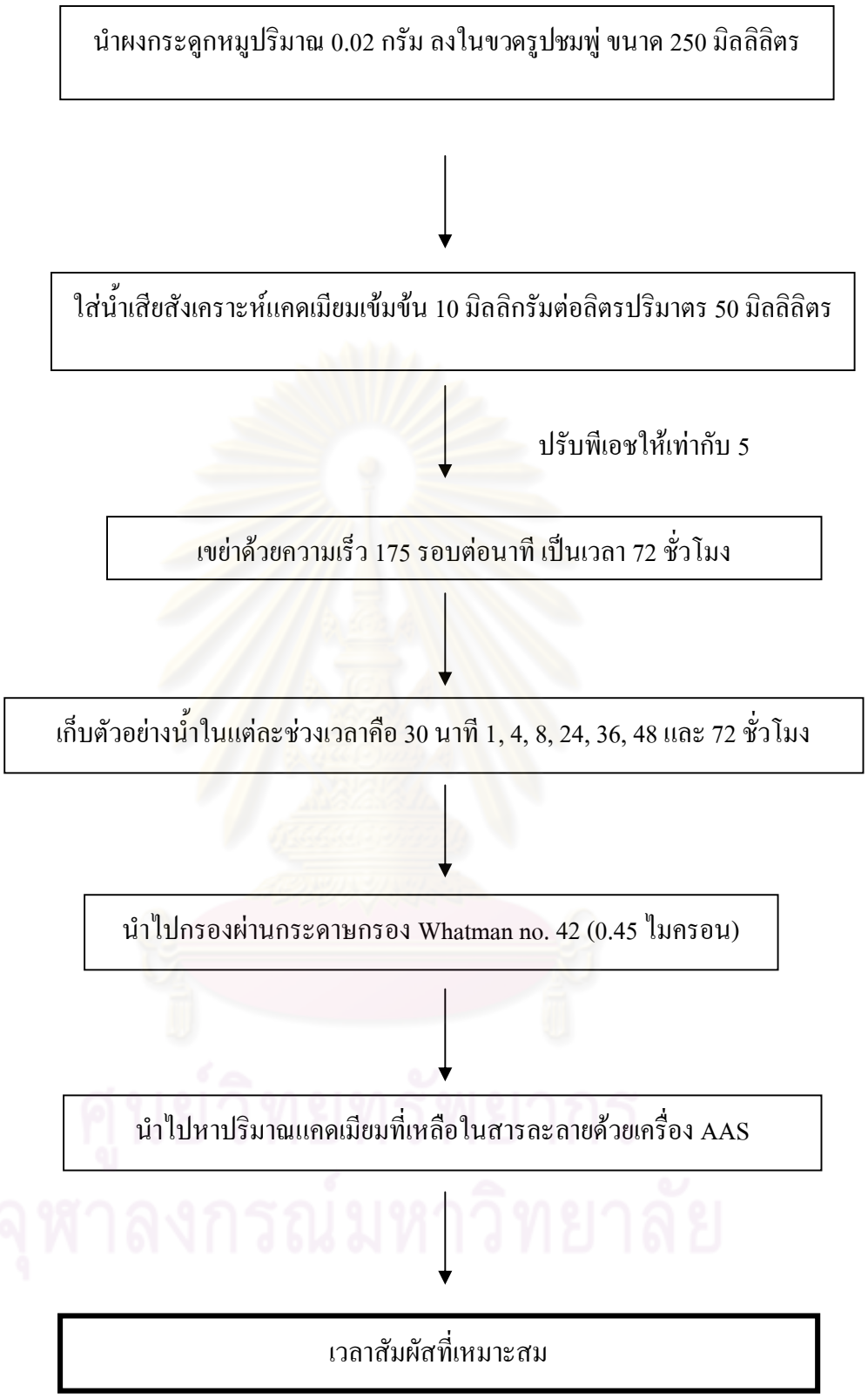
2.2) ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมกับประสิทธิภาพการกำจัดของผงกระดูกหมู (รูปที่ 3.3)

ใช้สารละลายแคดเมียมเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตรใช้ปริมาณผงกระดูกหมู 0.02 กรัม ที่พีเอช 5 เขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาที ในเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 2.1 จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman no. 42 (0.45 ไมครอน) จากนั้นนำไปวัดค่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง AAS

2.3) การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียม (รูปที่ 3.4)

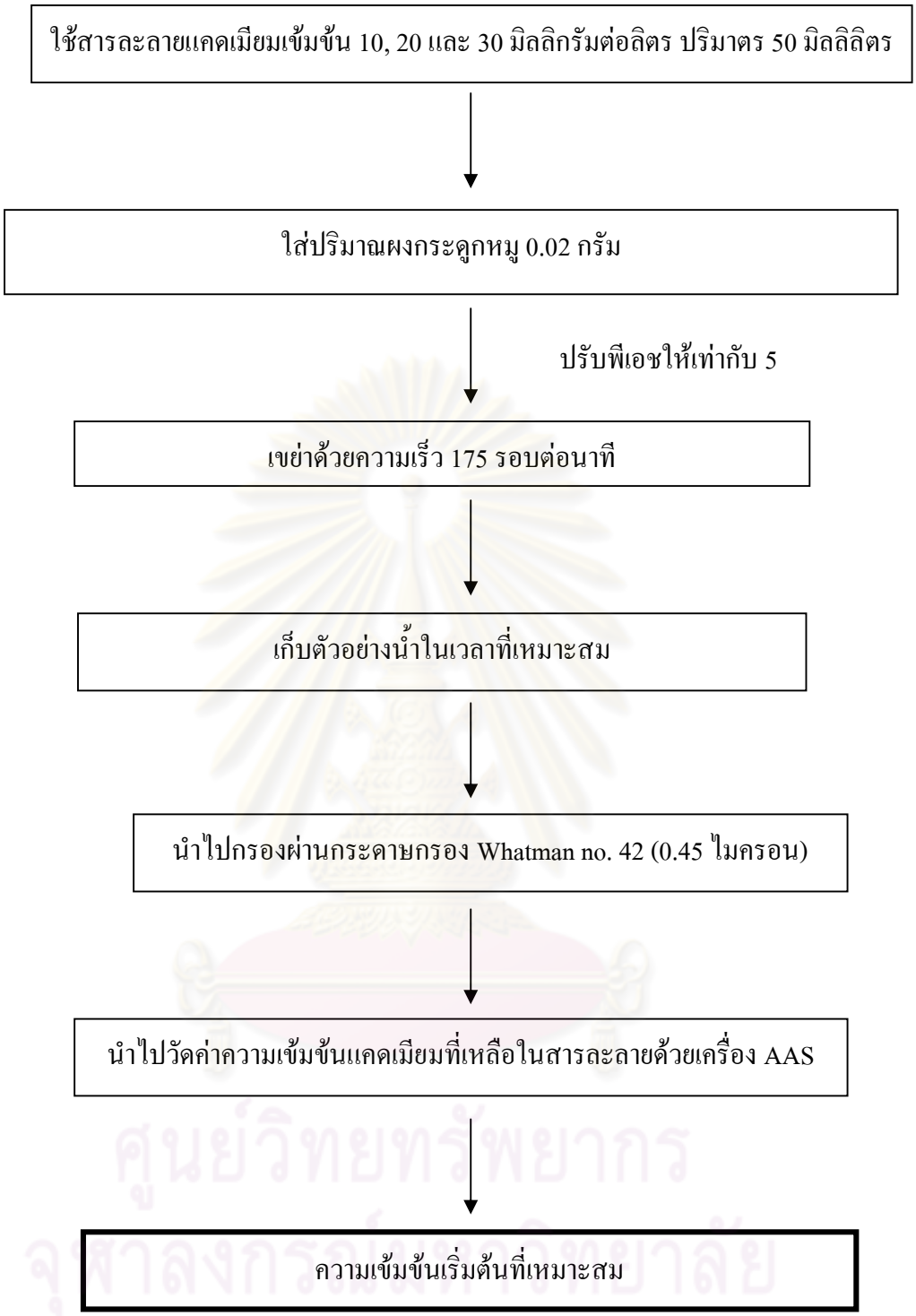
ใช้ผงกระดูกหมูปริมาณ 0.02, 0.05, 0.10, 0.50, 0.80 และ1.20 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมที่เหมาะสมจากข้อ 2.2 ที่พีเอช 5 เขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาทีในเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 2.1 นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman no. 42 (0.45 ไมครอน) จากนั้นนำไปหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง AAS

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 การทดลองหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของผงกระดูกหมูในการกำจัดแคดเมียม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมกับประสิทธิภาพการกำจัดของผงกระดูกหมู

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.5 การเตรียมดิน

1) นำดินบริเวณบ่อตาโล่ อำเภอวังน้อย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา มาวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมก่อนการทดลอง โดยร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆของดิน ดังตารางที่ 3.2

2) เตรียมการทดลองแบบ CRD (Completely Randomize Design) นำผงกระดูกหมูผสมลงไปในดินสัดส่วน 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ใช้ดิน 4 กิโลกรัมต่อกระถาง (ตารางที่ 3.3; ภาคผนวก ก) จากนั้นนำไปผสมกับ $Cd(NO_3)_2.4H_2O$ ที่ความเข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80 และ100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมของดิน แต่ละกระถางจะหุ้มด้วยถุงพลาสติก และใช้พันธุ์ข้าวสองชนิด คือ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 ใส่ปุ๋ยสูตร15-15-15 จะทำการทดลองสามซ้ำ ดังนั้นจะมี 72 หน่วยการทดลอง

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกายภาพและฟิสิกส์ของดิน

SOIL PROPERTIES	METHODS
pH	pH Meter Method (Peech, 1965)
Soil texture sand : silt :clay (%)	Hydrometer Method (ASTM, 1961)
CEC (meq/100g)	Amonium acetate Method (Attanant, Janjareansuk and Jittakanont, 1999)
Total Organic Matter (%)	Wallky-Black Method (Wallky and Black, 1934)
Cadmium (mg/kg soil DW)	HNO_3 and HCl acid Digestion (U.S.EPA., 1982)

ตารางที่ 3.3 ปริมาณของแคดเมียม ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) ที่ใช้ในการทดลอง

ความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมของดิน)	**ปริมาณของ ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) (กรัมต่อกระถาง)**
0	0
20	0.2195
40	0.4390
60	0.6585
80	0.8780
100	1.0974

3.3.6 การเตรียมเพาะกล้าพันธุ์ข้าว

คัดเลือกเมล็ดพันธุ์ข้าวให้มีขนาดพอๆกัน น้ำหนักใกล้เคียงกัน เมล็ดสมบูรณ์ไม่มีรอยแหว่งหรือถูกกัดกิน เพื่อให้ได้ต้นกล้าที่แข็งแรงและอยู่ในคุณภาพเดียวกันทั้งหมด ทำการเพาะเมล็ดพันธุ์ข้าวใส่กะบะหลุมสำหรับเพาะต้นกล้า ใช้เวลาประมาณ 2 สัปดาห์

1) วิเคราะห์แคดเมียมที่สะสมในต้นกล้าก่อนเริ่มการทดลอง โดยนำไปย่อยด้วย hot plate โดยใช้ HNO_3 : HCl (USEPA-3030, 1982) ทำให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดปริมาณแคดเมียมด้วย Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

2) วัดความสูงและน้ำหนักแห้ง

3) นำต้นกล้ามาปลูกในกระถาง 1 ต้นต่อกระถาง และเติมปุ๋ยสูตร 15-15-15

3.3.7 สังเกตการเจริญเติบโตของพืช

วัดความสูงทุก 7 วัน ตั้งแต่เริ่มจนจบการทดลอง เมื่อข้าวออกรวงจะทำการเก็บเกี่ยว ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 3-5 เดือน จากนั้นนำส่วนต่างๆไปวิเคราะห์ต่อไป

3.3.8 การวิเคราะห์ตัวอย่างพืชและดิน

ภายหลังการเก็บเกี่ยวนำตัวอย่างเมล็ด เปลือก ใบ ลำต้น และราก ไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน ในส่วนรากนั้นต้องนำมาล้างทำความสะอาด และเอาเศษดินที่ติดตามรากออกให้หมด จากนั้นนำตัวอย่างแห้งไปบด และย่อยด้วย hot plate โดยใช้ HNO_3 : HCl (USEPA-3030, 1982) แล้วนำไปวัดปริมาณแคดเมียมด้วย Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

สำหรับดินภายหลังเก็บเกี่ยวพืชแล้วนำมาคลุกเคล้าให้เข้ากัน นำมาบด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร แบ่งไปย่อยด้วย hot plate โดยใช้ HNO_3 : HCl (USEPA-3030, 1982) แล้วนำไปวัดปริมาณแคดเมียมด้วย Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

3.3.9 การวิเคราะห์ข้อมูล

1) การเจริญเติบโตของพืช

พิจารณาจากความสูง ตั้งแต่เริ่มจนจบการทดลอง แล้วหาน้ำหนักแห้งภายหลังการเก็บเกี่ยว

2) ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในพืช

คำนวณจากปริมาณโลหะหนักในส่วนต่างๆของพืช (mg) ต่อน้ำหนักแห้ง (kg) ดังสมการที่ 3.1

$$\text{แคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของพืช (mg/kg)} = \frac{\text{ปริมาณแคดเมียมในส่วนต่างๆของพืช (mg)}}{\text{น้ำหนักแห้ง (kg)}} \qquad (3.1)$$

3) ปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดออกจากดิน

ปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดออกจากดิน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ หาได้ดังสมการที่ 3.2

$$\%\ \text{แคดเมียมในพืช} = \frac{\text{ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในพืช (mg)}}{\text{ปริมาณความเข้มข้นแคดเมียมในกระถาง (mg)}} \times 100 \qquad (3.2)$$

3.3.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ

รวบรวมผลการทดลองและนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลของแคดเมียมต่อความสูง ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตข้าว ความแตกต่างของการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าว ในระดับความเข้มข้นแคดเมียมที่ต่างกันของพันธุ์ข้าวสองสายพันธุ์ โดยใช้โปรแกรม SPSS : One-way ANOVA ที่ระดับ $\rho < 0.01$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

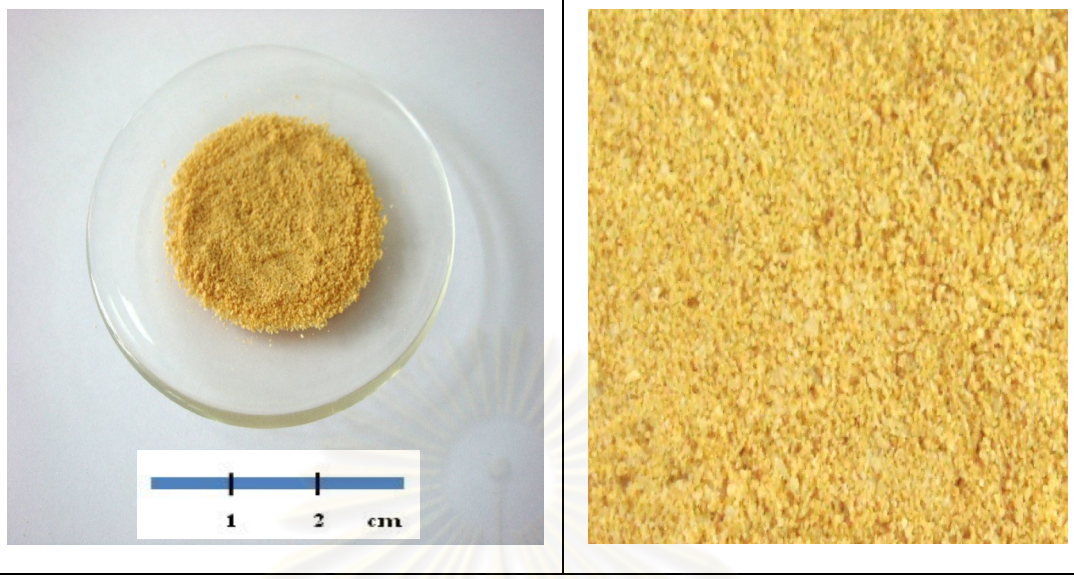
บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินของข้าวสองสายพันธุ์ คือ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 โดยใช้ผงกระดูกหมูเป็นตัวยับยั้ง ได้ศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิว เพื่อหาปริมาณผงกระดูกหมูที่เหมาะสม และเตรียมการทดลองแบบ Completely Randomize Design (CRD) ในบทนี้ประกอบด้วยผลการเตรียมผงกระดูกหมู ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของผงกระดูกหมู ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิว ผลการศึกษาคุณสมบัติของดิน ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของข้าวสองสายพันธุ์ ผลการศึกษาและเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของข้าวสองสายพันธุ์ในระดับความเข้มข้นและปริมาณผงกระดูกหมูที่แตกต่างกัน รวมทั้งผลการศึกษาการยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมในดินของข้าวสองสายพันธุ์ วิเคราะห์ผลการทดลองตามหัวข้อดังนี้

4.1 ผลการเตรียมผงกระดูกหมู

เตรียมสารดูดซับจากกระดูกหมูสด โดยนำกระดูกหมูสดไปต้มเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำมาล้างทำความสะอาด กำจัดไขมัน เส้นเอ็นและส่วนที่ไม่ต้องการออก กระดูกหมูมีกลิ่นเหม็นจึงต้องกำจัดกลิ่นด้วยน้ำเกลือ แล้วนำไปผึ่งแดดเป็นเวลา 2 สัปดาห์ เพื่อให้กระดูกหมูแห้งและอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง (รูปที่ 4.1) นำมาบดละเอียดด้วยเครื่องปั่นและนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช หรือ 45 ไมโครเมตร ผงกระดูกหมูที่เตรียมได้จะมีสีเหลืองน้ำตาล (รูปที่ 4.2) แล้วเก็บไว้ในถุงปิดผนึกอย่างดีเพื่อกันสัตว์รบกวน

รูปที่ 4.1 กระดูกหมูที่ผ่านการเตรียมเบื้องต้น



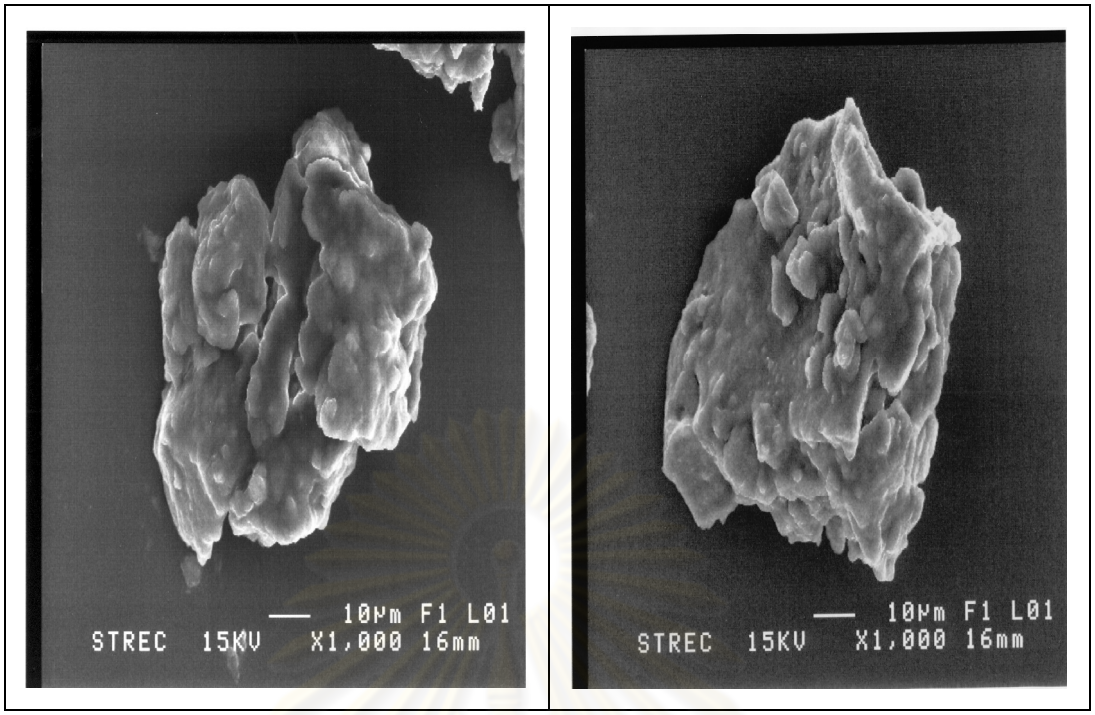
รูปที่ 4.2 ผงกระดูกหมูที่ใช้เป็นสารดูดซับ

4.2 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของผงกระดูกหมู

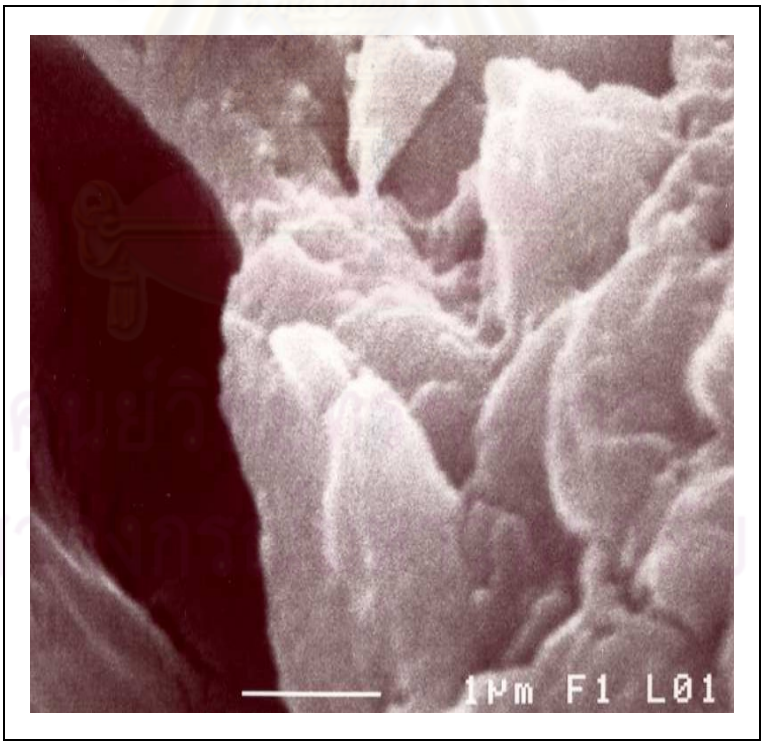
นำผงกระดูกหมูไปถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของโพรง ทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรทั้งหมดของโพรงด้วยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller (BET) ศึกษากลุ่มองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Fourier Transforms Infrared Spectrometer (FTIR) และโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)

4.2.1 การวิเคราะห์ผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

นำผงกระดูกหมูที่ผ่านการเตรียมแล้วไปทำเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ และเคลือบทองทำให้มีสมบัตินำไฟฟ้า เมื่อนำไปแสกนด้วยกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่ามีลักษณะพื้นผิวนูนขึ้นคล้ายเป็นปม และมีโพรงระหว่างปม ดังรูปที่ 4.3 และที่กำลังขยาย 10,000 เท่า จะเห็นโพรงในผงกระดูกหมูชัดเจนขึ้น ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของผงกระดูกหมู กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวของผงกระดูกหมู กำลังขยาย 10,000 เท่า

4.2.2 การวิเคราะห์ผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller (BET)

ทำการหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรทั้งหมดของโพรงและขนาดโพรงของผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller (BET) ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรทั้งหมดของโพรงและขนาดโพรงของผงกระดูกหมู

ชนิดสารดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/ กรัม)	ปริมาตรทั้งหมดของโพรง (ลบ.ซม. / กรัม)	ขนาดของโพรง (อังสตรอม)
ผงกระดูกหมู	3.245	0.0188	116.20

ผงกระดูกหมูที่ผ่านการต้ม 4 ชั่วโมง มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรทั้งหมดของโพรงและขนาดของโพรงมากกว่ากระดูกหมูที่ผ่านการต้ม 10 นาที และน้อยกว่ากระดูกหมูที่ผ่านการต้ม 10 ชั่วโมงประมาณสองเท่า (สุดารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์, 2551) ดังตารางที่ 4.2 แต่ในการทดลองนี้ไม่เลือกต้มกระดูกที่ 10 ชั่วโมง เนื่องจากใช้เวลาในการเตรียมนาน และเปลืองเชื้อเพลิง

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบการเตรียมสารดูดซับที่สภาวะต่างกัน

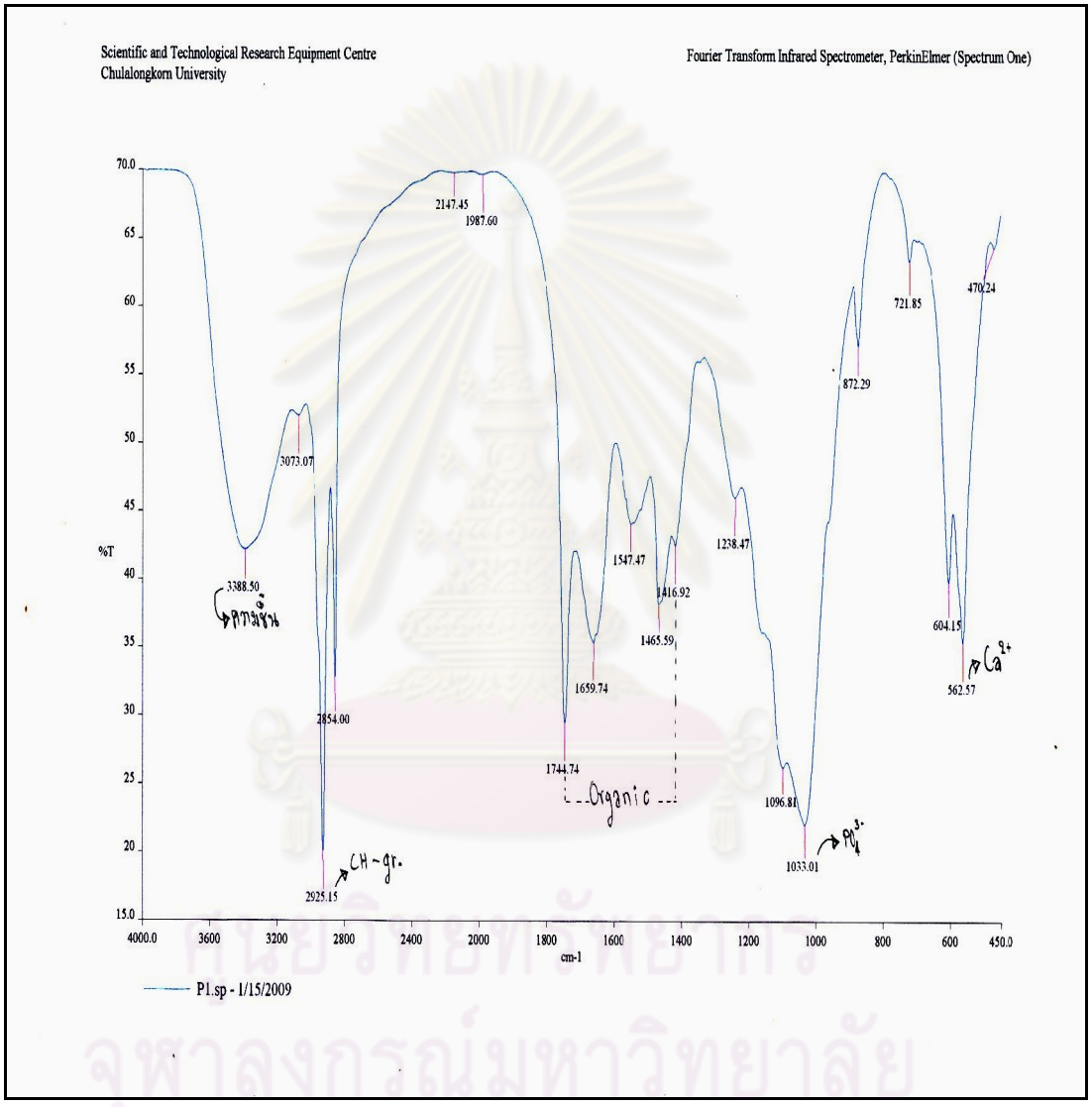
ชนิดสารดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/ กรัม)	ปริมาตรทั้งหมดของโพรง (ลบ.ซม. / กรัม)	ขนาดของโพรง (อังสตรอม)
ผงกระดูกหมู (4 ชั่วโมง)	3.245	0.0188	116.20
กระดูกหมูต้ม 10 นาที	0.860	0.0009	43.65
กระดูกหมูต้ม 10 ชั่วโมง	6.488	0.0376	231.60

4.2.3 การวิเคราะห์ผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง Fourier Transforms Infrared Spectrometer (FTIR)

การหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องฟลูเรีย ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปคโตรมิเตอร์ จะแสดงผลเป็นกราฟในช่วงความยาวคลื่น 450-4000 cm^{-1} ที่ความสูง (Peak) ของกราฟทำให้สามารถหาหมู่ฟังก์ชันนอลกรุ๊ป (Functional Group)ได้ พบว่า ผงกระดูกหมูประกอบไปด้วยความชื้น (3388.50 cm^{-1}) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (2854.00 cm^{-1} และ 2925.15 cm^{-1})

สารประกอบอินทรีย์ (1416.92 cm^{-1}, 1465.59 cm^{-1}, 1547.47 cm^{-1} , 1659.74 cm^{-1} และ1744.74 cm^{-1}) ฟอสเฟต (1033.01 cm^{-1}) คาร์บอเนต (721.85 cm^{-1}) และแคลเซียม (562.57 cm^{-1} และ 604.15 cm^{-1}) (รูปที่ 4.5)

จากองค์ประกอบดังกล่าวไอออนแคดเมียมจะสามารถเข้าไปแทนที่ไอออนแคลเซียมที่อยู่ในโครงสร้างได้



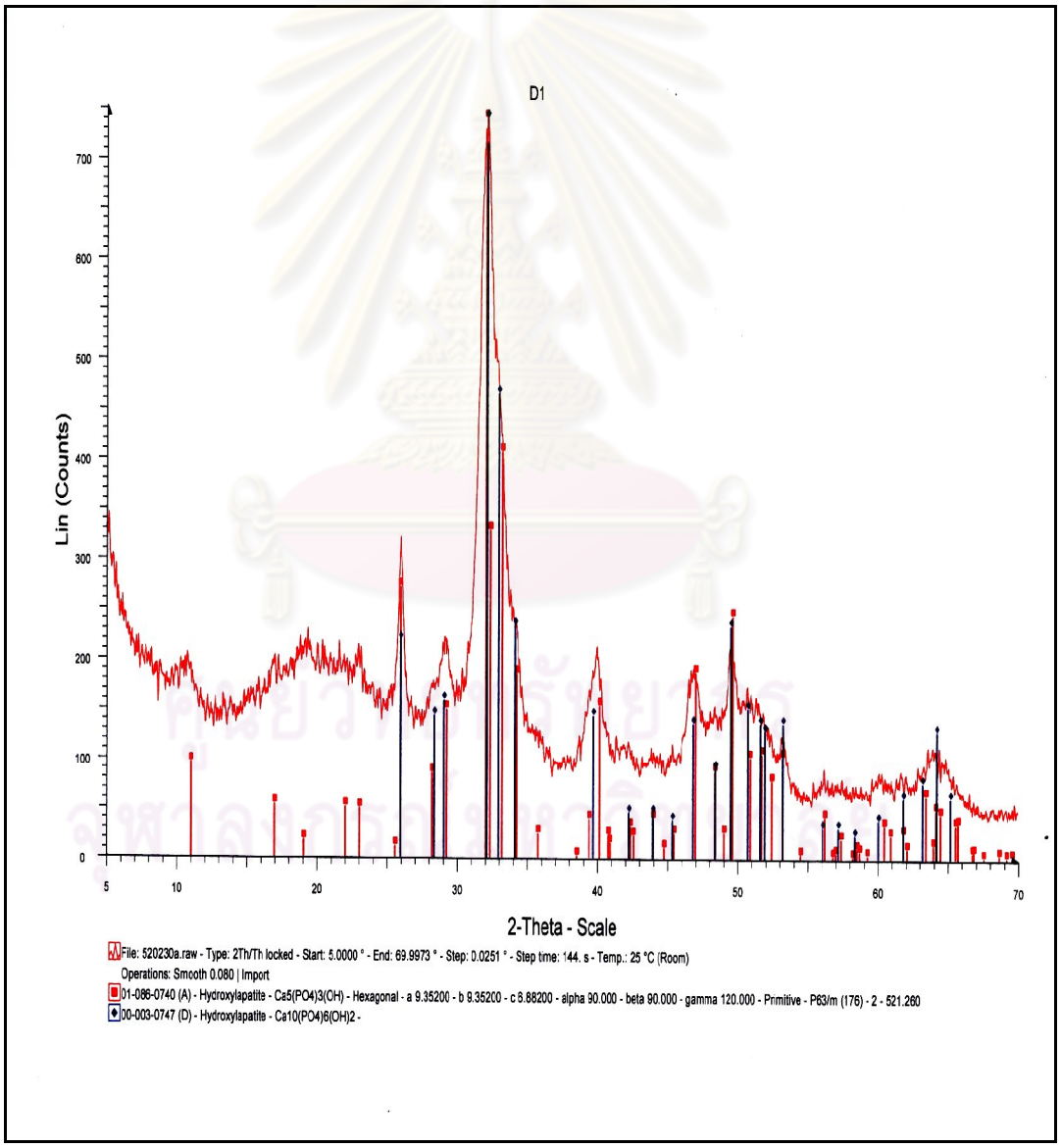
รูปที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีของผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง FTIR

4.2.4 การวิเคราะห์ผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)

ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของผงกระดูกหมูด้วยเครื่องเอ็กซเรย์ ดิฟเฟรคชันสเปคโตรมิเตอร์ พบว่า ผงกระดูกหมูมีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ สูตร

เคมี $Ca_5(PO_4)_3(OH)$ มีลักษณะเป็นผลึกรูปหกเหลี่ยม โดยมีมิติด้าน a และ b เท่ากับ 9.35200 อังสตรอม ด้าน c เท่ากับ 6.88200 อังสตรอม (รูปที่ 4.6) อัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสเป็น 1.70 เมื่อเปรียบเทียบกระดูกหมูกับกระดูกวัว พบว่ามีอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสใกล้เคียงกัน กระดูกวัวมีโครงสร้างผลึกเป็นรูปหกเหลี่ยม โดยมีมิติด้าน a และ b เท่ากับ 9.4230 อังสตรอม ด้าน c เท่ากับ 6.87500 อังสตรอม มีสูตรเคมี คือ $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ อัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส 1.68-2.0 (Aoki, 1991 อ้างถึงใน วรรณา โฆสิตะมงคล, 2538)

จากการศึกษาของ สุดารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์ (2551) พบว่าผงกระดูกหมูภายหลังการดูดซับแคดเมียมจะเกิดผลึกเฮกซะโกนัลของแคลเซียมแคดเมียมฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ สูตรเคมี $Ca_{3.9}(Ca_{4.7}Cd_{0.7}(PO_4)_6(OH)_{1.8}$ ซึ่งมีขนาดผลึกใกล้เคียงกับแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์



รูปที่ 4.6 โครงสร้างผลึกของผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง XRD

4.3 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของผงกระดูกหมู

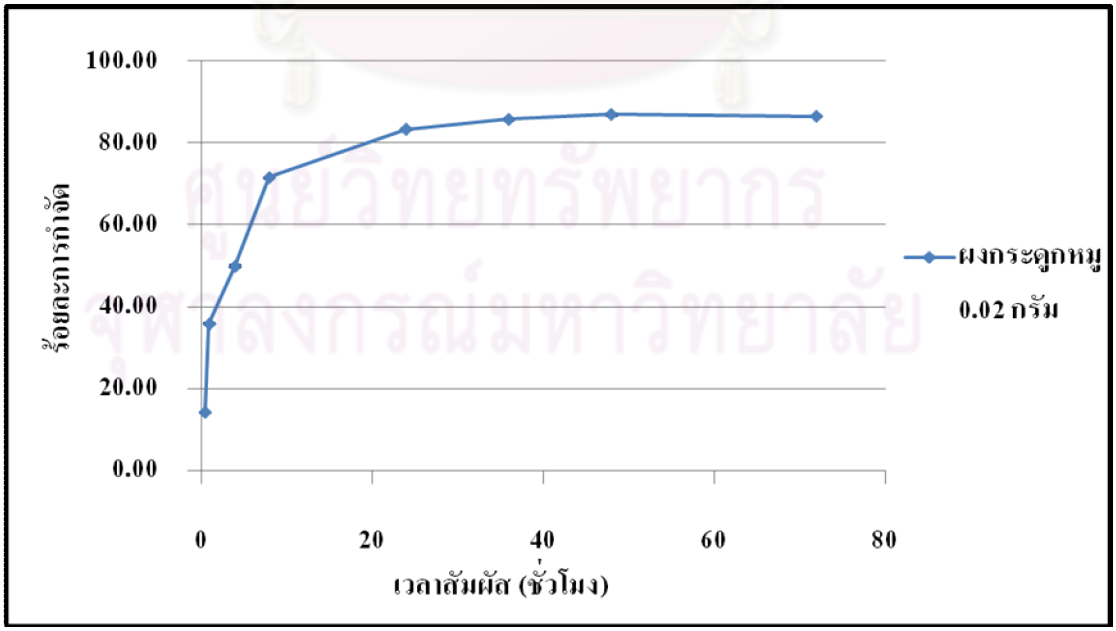
การทดลองนี้ใช้ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมเป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเตรียมจากสารละลายมาตรฐานแคดเมียมไนเตรท

4.3.1 ผลการทดลองหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของผงกระดูกหมูในการกำจัดแคดเมียม

ใช้ปริมาณผงกระดูกหมู 0.02 กรัม น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่พีเอช 5 เขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำในแต่ละช่วงเวลาคือ 30 นาที 1, 4, 8, 24, 36, 48 และ 72 ชั่วโมง นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman no. 42 (0.45 ไมครอน) จากนั้นนำไปหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง AAS (ภาคผนวก ข; ตารางที่ ข-1)

จากการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง มีร้อยละการกำจัดแคดเมียมสูงสุด คือ 86.52 แสดงดังรูปที่ 4.7

อัตราการดูดซับแคดเมียมของผงกระดูกหมูจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสและจะลดลงจนเกือบคงที่เมื่อใกล้สู่จุดสมดุล ดังนั้นเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมในการเข้าสู่สมดุลของสารดูดซับ คือ 72 ชั่วโมง สอดคล้องกับ (จักรพงษ์ แสนชัย, 2548; สุดารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์, 2551)

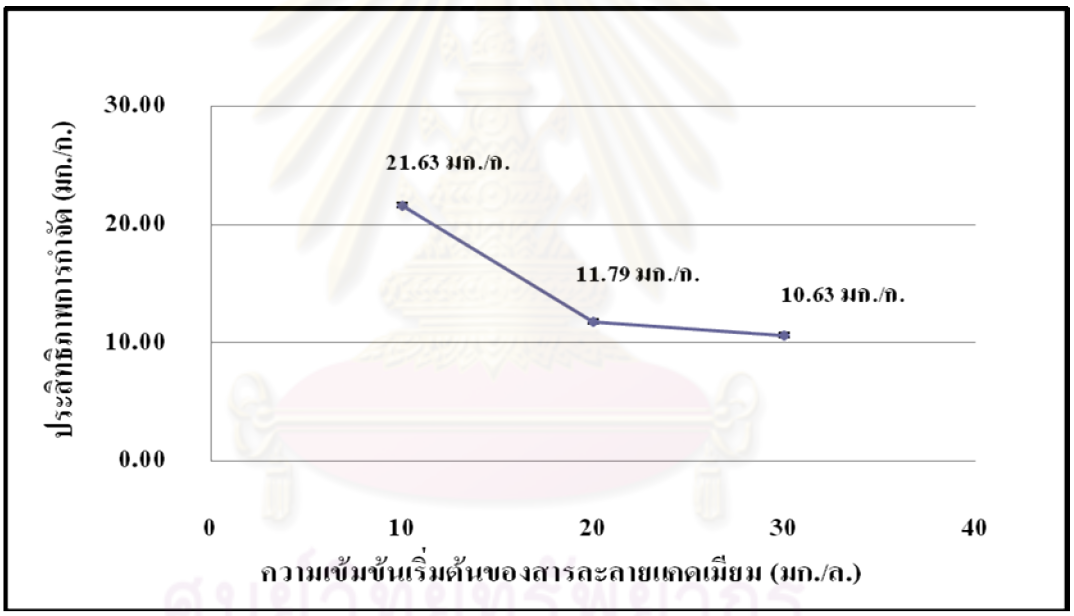


รูปที่ 4.7 ร้อยละการกำจัดแคดเมียมกับระยะเวลาสัมผัสของผงกระดูกหมู

4.3.2 ผลการทดลองหาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมกับประสิทธิภาพการกำจัดของผงกระดูกหมู

ใช้สารละลายแคดเมียมเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตรใช้ปริมาณผงกระดูกหมู 0.02 กรัม ที่พีเอช 5 เขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman no. 42 (0.45 ไมครอน) จากนั้นนำไปวัดค่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง AAS (ภาคผนวก ข; ตารางที่ ข-2 ถึง ข-4)

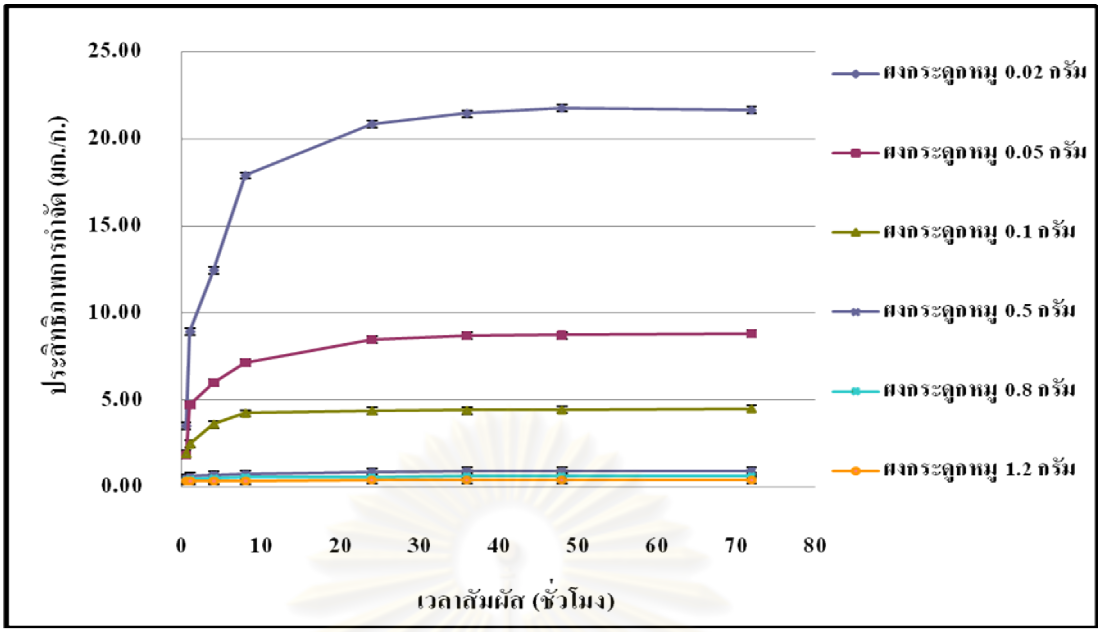
ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียม 10, 20, และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียม 21.63, 11.79 และ 10.63 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ดังนั้นความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสม คือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เพราะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูงที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมกับความเข้มข้นเริ่มต้นของผงกระดูกหมู

4.3.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมู

ใช้ผงกระดูกหมูปริมาณ 0.02, 0.05, 0.10, 0.50, 0.80 และ1.20 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 เขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาที เวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman no. 42 (0.45 ไมครอน) จากนั้นนำไปหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง AAS (ภาคผนวก ข; ตารางที่ ข-5 ถึง ข-10) แสดงดังรูปที่ 4.9

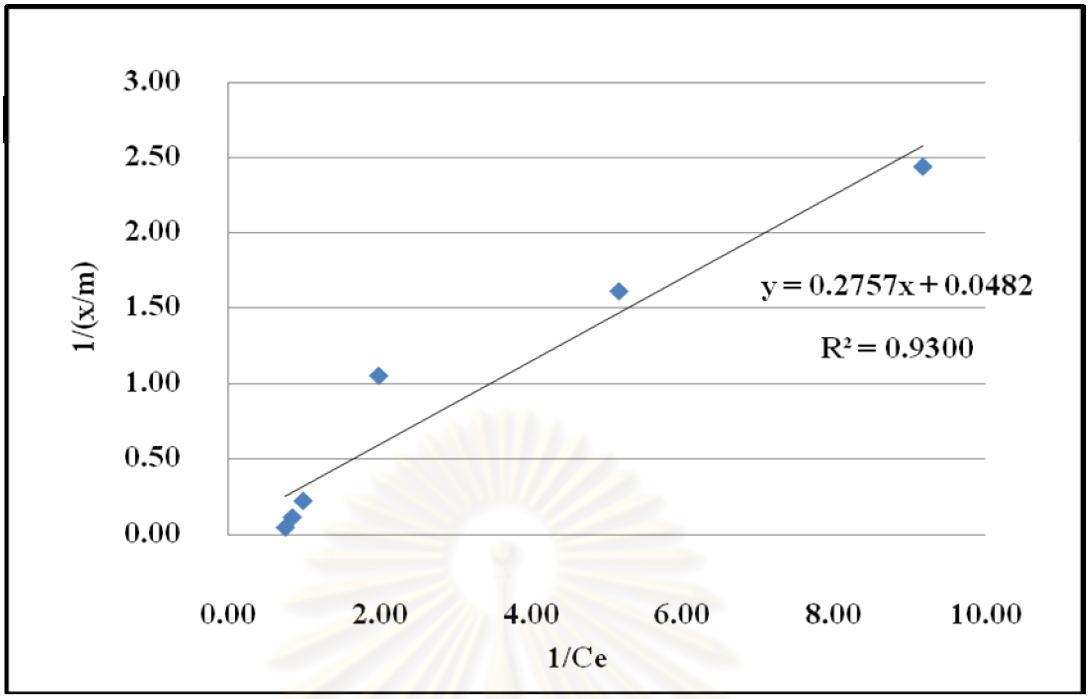


รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมกับปริมาณผงกระดูกหมูที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ

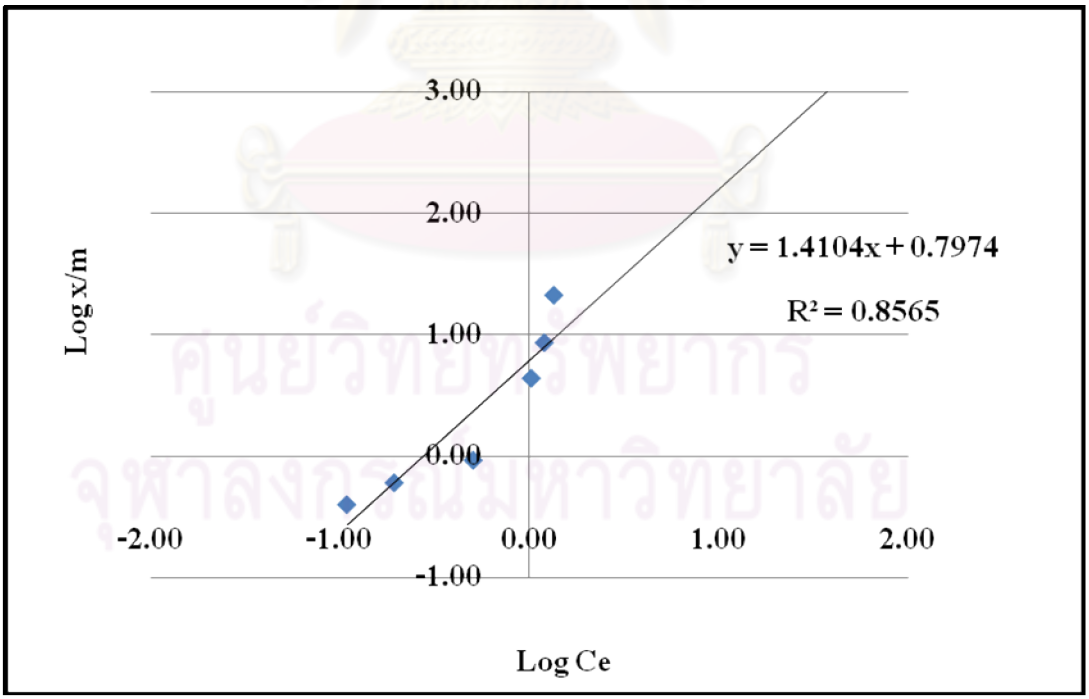
จากผลการทดลอง พบว่า ผงกระดูกหมูที่ 0.02 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมสูงสุด คือ 21.63 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อพิจารณาผลการทดลองโดยอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ไอโซเทอม 2 แบบ คือ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และแบบแลงมัวร์ (ภาคผนวก ข; ตารางที่ ข-11) พบว่า ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์เหมาะสมกว่าแบบฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่า และมีความชันกราฟมากกว่า จึงเป็นระบบดูดซับที่ผิวของสารดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) สอดคล้องกับ (Lurtwitayapont และ Srisatit, 2010) ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 สรุปค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมูแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิช ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมูแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิช

ค่าคงที่	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช
Linear equation	$1/(x/m) = 0.2757(1/C_e) + 0.0482$	$\text{Log } (x/m) = 1.4104 \text{Log } C_e + 0.7974$
R^2	0.9300	0.8565
Y intercept	0.0482	0.7974
Slope	0.2757	1.4104



รูปที่ 4.10 ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมูแบบแลงมัวร์



รูปที่ 4.11 ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมูแบบฟรุนดลิช

4.4 ศึกษาคุณสมบัติดินที่ใช้ในการทดลอง

ดินที่ใช้ในการทดลอง นำมาจากบริเวณตำบลบ่อตาโล่ อำเภอวังน้อย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งเป็นดินบริเวณที่นา สีของดินค่อนข้างดำ เก็บตัวอย่างดินที่ความลึก 0-20 เซนติเมตร และนำดินมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อวิเคราะห์สมบัติต่างๆของดิน (วิธีวิเคราะห์ตามภาคผนวก ค) ได้ผลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมบัติต่างๆของดิน

สมบัติดิน	ผลการวิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
pH	5.24	pH Meter Method
sand : silt : clay (%)	30.45 : 25.58 : 70.24	Hydrometer Method
เนื้อดิน	ดินเหนียว	Hydrometer Method
CEC (meq/100g)	82.46	Amonium acetate Method
Total Organic Matter (%)	6.15	Wallky-Black Method
Cadmium (mg/kg soil DW)	ND	HNO_3 and HCl acid Digestion

หมายเหตุ : ND = non determination (Cd detection limit : 0.01 mg/l)

4.5 ศึกษาความเข้มข้นแคดเมียมของพันธุ์ข้าวก่อนการทดลอง

พันธุ์ข้าวที่ใช้ในการทดลองมีสองสายพันธุ์ คือ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 ทำการปลูกข้าวในกระถาง โดยใช้ดินบริเวณตำบลบ่อตาโล่ อำเภอวังน้อย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เมื่อเวลาผ่านไป 1 สัปดาห์ ข้าวจะงอกเป็นต้นกล้าเล็กๆสูงประมาณ 5 เซนติเมตร รอจนครบสองสัปดาห์จะมีความสูงประมาณ 10-15 เซนติเมตร จึงเก็บตัวอย่างต้นกล้าทั้งต้น คือ ราก ลำต้น และใบ นำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในข้าวสองสายพันธุ์ ได้ผลตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปริมาณแคดเมียมในพันธุ์ข้าวก่อนการทดลอง

พันธุ์ข้าว	ความเข้มข้นแคดเมียม (mg/kg)
ข้าวขาวดอกมะลิ 105	ND
ข้าวเหนียว กข 6	ND

หมายเหตุ : ND = non determination (Cd detection limit : 0.01 mg/l)

ผลการวิเคราะห์แคดเมียมในข้าวสองสายพันธุ์ก่อนการทดลอง พบว่า ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณแคดเมียมได้ เนื่องจากความเข้มข้นน้อยสุดของเครื่อง AAS ที่สามารถตรวจวัดได้ของแคดเมียม คือ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.6 ศึกษาผลของความเข้มข้นแคดเมียมที่ระดับต่างกันที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าวสองสายพันธุ์

เตรียมการทดลองแบบ Completely Randomize Design (CRD) โดยนำผงกระดูกหมูผสมลงไปในดินสัดส่วน 5 กรัม และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งสัดส่วนที่ใส่ในดินคิดจากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมู โดยพบว่า ผงกระดูกหมู 1 กรัม สามารถกำจัดแคดเมียมได้สูงสุด 21.63 มิลลิกรัม ในการทดลองนี้จะใช้ความเข้มข้นแคดเมียมที่ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ดังนั้นที่ความเข้มข้นสูงสุด คือ 100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน จึงใช้ผงกระดูกหมู 4.62 กรัมต่อกิโลกรัมดิน จึงเลือกใช้ผงกระดูกหมูที่ 5 กรัม และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และใช้ดิน 4 กิโลกรัมต่อกระถาง

4.6.1 การเจริญเติบโตของข้าวในระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน

ข้าวสองสายพันธุ์สามารถเจริญเติบโตได้ดี ไม่มีโรคและออกรวงในทุกระดับความเข้มข้น คือ 0, 20, 40, 60, 80 และ100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน (ภาคผนวก ง) ที่ระดับความเข้มข้นสูงจะเจริญเติบโตช้ากว่าที่ความเข้มข้นต่ำในระยะแรก อาจเนื่องมาจากมีปริมาณแคดเมียมสูงทำให้การเจริญเติบโตช้าลง

ข้าวเหนียว กข 6 จะเริ่มแตกกอเมื่อปลูกไปได้ 1 เดือน มีลักษณะลำต้นเขียว อวบ ใบยาวสีเขียวเข้ม ข้าวจะออกรวงเมื่อระยะเวลาปลูกประมาณ 2 เดือน โดยที่ข้าวที่ปลูกในระดับความเข้มข้นต่ำจะออกรวงก่อนข้าวที่ปลูกในระดับความเข้มข้นสูง และเก็บเกี่ยวรวงเมื่อข้าวมีอายุครบ 3 เดือน

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 จะเริ่มแตกกอเมื่อปลูกได้ประมาณเดือนครึ่ง ลักษณะลำต้นมีสีเขียวจาง อวบ ใบตั้งตรงสีเขียวอ่อน ข้าวจะออกรวงเมื่อระยะเวลาปลูก 4 เดือน ซึ่งออกรวงช้ากว่าปกติ ทำให้มีระยะเวลาเก็บเกี่ยวนานถึง 5 เดือน

4.6.2 ผลของความสูงกับระดับความเข้มข้นแคดเมียม

การทดลองนี้จะศึกษาการเจริญเติบโตโดยดูจากความสูงของข้าว ในระดับความเข้มข้นแคดเมียมที่ 0, 20, 40, 60, 80 และ100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดินจะวัดความสูงทุกๆ 7 วัน (ภาคผนวก จ; ตารางที่ จ-1 ถึง จ-2) ความสูงวัดจากส่วนล่างสุดของต้นที่หน้าผิวดินในกระถางถึงปลายสุดของใบโดยใช้มือรวบใบทั้งหมดและวัด

ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105 แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105

ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg Cd/kg soil)	**N**	**ความสูงเฉลี่ย (cm)**	
		ผงกระดูกหมู 5 g/kg soil	**ผงกระดูกหมู 10 g/kg soil**
0	3	109.9 ± 0.36	111.5 ± 1.05
20	3	109.4 ± 1.25	110.2 ± 0.06
40	3	108.2 ± 0.29	109.0 ± 0.72
60	3	108.0 ± 0.83	108.5 ± 0.59
80	3	107.1 ± 0.66	107.8 ± 1.19
100	3	107.0 ± 0.71	107.6 ± 2.42
F-value	18	8.032	4.273
Sig.	18	0.002	0.018

เมื่อพิจารณาผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า ความสูงเฉลี่ยลดลงเมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมสูงขึ้น โดยชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน มีความสูงเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80 และ100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ส่วนชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน มีความสูงเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80 และ100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาคผนวก จ; ตารางที่ จ-3, จ-4 และ จ-7)

ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวเหนียว กข 6 แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวเหนียว กข 6

ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg Cd/kg soil)	**N**	**ความสูงเฉลี่ย (cm)**	
		ผงกระดูกหมู 5 g/kg soil	**ผงกระดูกหมู 10 g/kg soil**
0	3	95.9 ± 0.70	98.1 ± 0.67
20	3	94.9 ± 1.93	96.3 ± 0.90
40	3	94.5 ± 1.22	95.3 ± 2.12
60	3	93.9 ± 0.98	94.4 ± 0.90
80	3	93.8 ± 0.67	94.3 ± 0.65
100	3	93.1 ± 0.51	94.0 ± 0.64
F-value	18	2.262	6.094
Sig.	18	0.115	0.005

เมื่อพิจารณาผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวเหนียว กข 6 พบว่า ความสูงเฉลี่ยลดลงเมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมสูงขึ้น โดยชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน มีความสูงเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80 และ100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ส่วนชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน มีความสูงเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80 และ100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาคผนวก จ; ตารางที่ จ-5, จ-6 และ จ-8)

จากผลข้างต้น พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีความสูงเฉลี่ยมากกว่าข้าวเหนียว กข 6 และข้าวทั้งสองสายพันธุ์มีความสูงเฉลี่ยในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดินมากกว่า 5 กรัมต่อกิโลกรัมดินในทุกระดับความเข้มข้นแคดเมียม เมื่อเปรียบเทียบผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวสองสายพันธุ์ พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน (ภาคผนวก จ; ตารางที่ จ-9 และจ-10)

ดังนั้นปริมาณแคดเมียมมีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าวทั้งสองสายพันธุ์ การเจริญเติบโตลดลงอาจเนื่องจากเกิดความเป็นพิษของแคดเมียม แต่ไม่แสดงอาการเป็นพิษให้เห็นซึ่งเหมือนกับข้าวที่ปลูกในบริเวณบ้านพะเด๊ะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก พบความเข้มข้นแคดเมียมสูงในตัวอย่างข้าวใกล้คลองส่งน้ำ แต่ไม่แสดงอาการผิดปกติทางลำต้น และใบให้เห็นด้วยตาเปล่า (พิชิต พงษ์สกุล, 2545) ค่าวิกฤติที่แสดงอาการเป็นพิษในข้าว อยู่ระหว่าง 5-10 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540) ซึ่ง Balestrasse และคณะ (2003) และ Siritporndulsil และคณะ (2002) รายงานว่า แคดเมียมมีผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ และกระบวนการสังเคราะห์แสงลดลง เมื่อมีปริมาณแคดเมียมสูงในพืช ทำให้เอนไซม์ไรบูโลสบิสฟอสเฟต-คาร์บอกซิเลส (RuBP-carboxylase) ที่เกิดในส่วนของวัฏจักรการสังเคราะห์แสง (calvin cycle) เสียสมดุล

4.6.3 การให้ผลผลิตของข้าวสองสายพันธุ์

ผลผลิตของข้าวสองสายพันธุ์ คิดเป็นน้ำหนักแห้ง (กรัม) (ภาคผนวก ฉ; ตารางที่ ฉ-1 ถึง ฉ-4) จากการทดลอง พบว่า เมล็ดข้าวสมบูรณ์ เรียวยาว เปลือกสีน้ำตาล

ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105

ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg Cd/kg soil)	**N**	**ผลผลิตเฉลี่ย (g-dry weight)**	
		ผงกระดูกหมู 5 g/kg soil	**ผงกระดูกหมู 10 g/kg soil**
0	3	70.24 ± 0.68	75.54 ± 1.43
20	3	68.22 ± 0.58	72.57 ± 0.21
40	3	64.35 ± 2.31	68.25 ± 0.67
60	3	60.01 ± 0.17	62.37 ± 2.65
80	3	58.08 ± 0.18	60.29 ± 0.68
100	3	55.81 ± 1.81	57.70 ± 2.28
F-value	18	63.330	60.061
Sig.	18	0.000	0.000

เมื่อพิจารณาผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า น้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวเฉลี่ยลดลงเมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมสูงขึ้น โดยชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน มีน้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80 และ100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาคผนวก ฉ; ตารางที่ ฉ-5, ฉ-6 และ ฉ-9)

ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวเหนียว กข 6 แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวเหนียว กข 6

ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg Cd/kg soil)	**N**	**ผลผลิตเฉลี่ย (g-dry weight)**	
		ผงกระดูกหมู 5 g/kg soil	**ผงกระดูกหมู 10 g/kg soil**
0	3	57.40 ± 0.71	61.26 ± 1.36
20	3	54.57 ± 0.99	57.73 ± 1.66
40	3	52.72 ± 0.29	55.29 ± 0.06
60	3	51.17 ± 1.08	53.57 ± 2.14
80	3	48.51 ± 1.00	50.28 ± 0.90
100	3	46.92 ± 2.96	48.14 ± 1.69
F-value	18	21.643	32.366
Sig.	18	0.000	0.000

เมื่อพิจารณาผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวเหนียว กข 6 พบว่า น้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวเฉลี่ยลดลงเมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมสูงขึ้น โดยชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน มีน้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80 และ100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาคผนวก ฉ; ตารางที่ ฉ-7, ฉ-8 และ ฉ-10)

จากผลข้างต้น พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 จะให้ผลผลิตมากกว่าข้าวเหนียว กข 6 โดยข้าวทั้งสองสายพันธุ์ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน จะให้ผลผลิตมากกว่าชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น 1.67-3.77% และ 1.30-3.36% ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวสองสายพันธุ์ พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน (ภาคผนวก ฉ; ตารางที่ ฉ-11 และฉ-12)

ในงานวิจัยของ สรัตนา เสนาะ (2548) ทำการทดลองปลูกข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ซึ่งมีลักษณะคล้ายข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 พบว่า ข้าวที่ปลูกที่ความเข้มข้นแคดเมียม 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน จะให้ผลผลิต 60.04 กรัมของน้ำหนักแห้ง ส่วนในงานวิจัยนี้ข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีการเติมผงกระดูกหมูลงในดิน ให้ผลผลิตที่ 70.24 และ 75.54 กรัมของน้ำหนักแห้ง แสดงว่าการเติมผงกระดูกหมูเป็นการทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น 8.49% และ 12.91% ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ

4.7 ศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวสองสายพันธุ์

ภายหลังการเก็บเกี่ยว จะศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวสองสายพันธุ์ ได้แก่ เมล็ด เปลือก ใบ ลำต้น และราก (ภาคผนวก ช; ตารางที่ ช-1 ถึง ช-4)

4.7.1 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน แสดงดังตารางที่ 4.10 และ 4.11

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg Cd/kg soil)	N	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆ (mg/kg) ที่เติมผงกระดูกหมู 5 g/kg soil				
		เมล็ด	เปลือก	ใบ	ลำต้น	ราก
0	3	ND	ND	ND	ND	ND
20	3	ND	ND	ND	1.50 ± 0.03	2.05 ± 0.04
40	3	ND	ND	ND	2.22 ± 0.09	5.90 ± 0.08
60	3	ND	ND	ND	2.54 ± 0.10	10.89 ± 0.08
80	3	ND	ND	0.51 ± 0.06	6.52 ± 0.08	15.83 ± 0.10
100	3	ND	ND	0.67 ± 0.07	7.32 ± 0.18	27.16 ± 0.18
F-value	18	-	-	186.626	2735.706	31603.007
Sig.	18	-	-	0.000	0.000	0.000

หมายเหตุ : ND = non determination (Cd detection limit : 0.01 mg/l)

ตารางที่ 4.11 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg Cd/kg soil)	N	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆ (mg/kg) ที่เติมผงกระดูกหมู 10 g/kg soil				
		เมล็ด	เปลือก	ใบ	ลำต้น	ราก
0	3	ND	ND	ND	ND	ND
20	3	ND	ND	ND	1.07 ± 0.12	1.25 ± 0.04
40	3	ND	ND	ND	1.92 ± 0.09	3.88 ± 0.14
60	3	ND	ND	ND	3.84 ± 0.11	6.61 ± 0.23
80	3	ND	ND	0.43 ± 0.05	5.45 ± 0.06	10.94 ± 0.28
100	3	ND	ND	0.51 ± 0.04	6.67 ± 0.13	21.30 ± 0.20
F-value	18	-	-	274.178	2160.036	5739.095
Sig.	18	-	-	0.000	0.000	0.000

หมายเหตุ : ND = non determination (Cd detection limit : 0.01 mg/l)

เมื่อพิจารณาปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 กรัม และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า มีปริมาณแคดเมียมสะสมในส่วนรากมากที่สุด รองลงมาคือ ลำต้น และใบ ตามลำดับ ซึ่งเป็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาคผนวก ช; ตารางที่ ช-5, ช-6 และ ช-9)

4.7.2 ข้าวเหนียว กข 6

ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆ ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน แสดงดังตารางที่ 4.12 และ 4.13

ตารางที่ 4.12 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg Cd/kg soil)	**N**	**ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆ (mg/kg) ที่เติมผงกระดูกหมู 5 g/kg soil**				
		เมล็ด	**เปลือก**	**ใบ**	**ลำต้น**	**ราก**
0	3	ND	ND	ND	ND	ND
20	3	ND	ND	ND	3.23 ± 0.15	4.12 ± 0.04
40	3	ND	ND	0.44 ± 0.03	4.26 ± 0.08	14.28 ± 0.04
60	3	ND	ND	0.78 ± 0.02	5.65 ± 0.09	25.48 ± 0.12
80	3	ND	ND	0.81 ± 0.02	9.25 ± 0.03	38.01 ± 0.06
100	3	ND	ND	1.40 ± 0.04	14.57 ± 0.17	55.51 ± 0.10
F-value	18	-	-	1664.002	7060.523	255206.470
Sig.	18	-	-	0.000	0.000	0.000

หมายเหตุ : ND = non determination (Cd detection limit : 0.01 mg/l)

ตารางที่ 4.13 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg Cd/kg soil)	N	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆ (mg/kg) ที่เติมผงกระดูกหมู 10 g/kg soil				
		เมล็ด	เปลือก	ใบ	ลำต้น	ราก
0	3	ND	ND	ND	ND	ND
20	3	ND	ND	ND	2.24 ± 0.04	3.22 ± 0.04
40	3	ND	ND	0.37 ± 0.02	3.07 ± 0.04	8.33 ± 0.03
60	3	ND	ND	0.61 ± 0.03	4.95 ± 0.14	20.25 ± 0.27
80	3	ND	ND	0.73 ± 0.05	5.80 ± 0.06	32.80 ± 0.28
100	3	ND	ND	1.28 ± 0.09	7.02 ± 0.02	48.66 ± 0.10
F-value	18	-	-	369.723	4381.668	39291.985
Sig.	18	-	-	0.000	0.000	0.000

หมายเหตุ : ND = non determination (Cd detection limit : 0.01 mg/l)

เมื่อพิจารณาปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 กรัม และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า มีปริมาณแคดเมียมสะสมในส่วนรากมากที่สุด รองลงมาคือ ลำต้น และใบ ตามลำดับ ซึ่งเป็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาคผนวก ช; ตารางที่ ช-7, ช-8 และ ช-10)

จากการสำรวจตัวอย่างข้าวที่ปลูกในบริเวณบ้านพะเด๊ะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ของ พิชิต พงษ์สกุล (2545) และ Simmos และคณะ (2003) ตรวจพบความเข้มข้นแคดเมียมในใบเท่ากับ 0.05-13.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และลำต้น เท่ากับ 0.38-22.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งในการทดลองนี้มีการใช้ผงกระดูกหมูยับยั้งการดูดดึงแคดเมียม จึงทำให้ข้าวมีความเข้มข้นในใบและลำต้นน้อยกว่าค่าที่ตรวจวัดได้ข้างต้น

4.7.3 เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของข้าวสองสายพันธุ์

การสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าว พบว่า ข้าวเหนียว กข 6 มีการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆมากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งข้าวสองสายพันธุ์ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน มีการสะสมแคดเมียมในส่วนรากมากที่สุด รองลงมา คือ ลำต้นและใบ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของข้าวสองสายพันธุ์ พบว่า ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ลำต้นและราก ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนใบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ลำต้น ใบ และราก ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาคผนวก ช; ตารางที่ ช-11 และช-12)

จากการศึกษาการดูดดึงแคดเมียมในดินของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ของสรัตนา เสนาะ (2548) ที่ระดับความเข้มข้นแคดเมียม 0, 3, 48, 277 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน โดยใช้ดิน 10 กิโลกรัมต่อกระถาง พบว่า ที่ความเข้มข้นแคดเมียม 48 และ 277 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ข้าวเริ่มแสดงอาการเป็นพิษ โดยที่ลำต้น และใบมีสีเหลืองซีด ส่งผลทำให้ลำต้นแคระแกร็น และไม่ให้ผลผลิตเมื่อถึงระยะเก็บเกี่ยว ส่วนที่ความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน มีแคดเมียมสะสมในเมล็ดข้าว 0.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเกินค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยเติมผงกระดูกหมูลงในดินที่ 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ข้าวสองสายพันธุ์ให้ผลผลิตทุกระดับความเข้มข้น ลำต้นและใบไม่แสดงอาการเป็นพิษให้เห็น ลำต้นเขียวอวบ ใบไม่ซีดเหลือง ในเมล็ดข้าวและเปลือกข้าวของข้าวสองสายพันธุ์ ไม่พบแคดเมียมสะสม แสดงว่าผงกระดูกหมูที่เติมลงในดินสามารถยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมได้ผลดี

4.8 เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมดและดินของข้าวสองสายพันธุ์กับปริมาณผงกระดูกหมู

4.8.1 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%)

ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด จะแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ซ; ตารางที่ ซ-1 ถึง ซ-4) โดยคิดจากปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆข้าวทั้งหมด (มิลลิกรัม) ต่อปริมาณแคดเมียมที่ใส่ทั้งหมดในกระถาง (มิลลิกรัม)

ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ทั้งหมด (%) แสดงผลดังตารางที่ 4.14

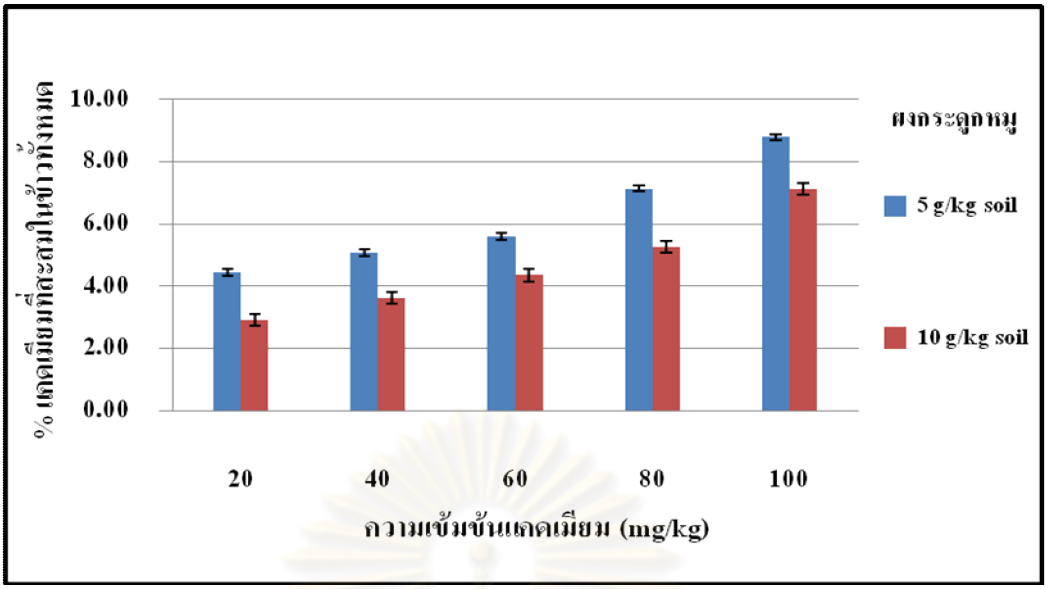
ตารางที่ 4.14 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105

ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg Cd/kg soil)	**N**	**% แคดเมียมในต้นข้าวทั้งหมด**	
		ผงกระดูกหมู 5 g/kg soil	**ผงกระดูกหมู 10 g/kg soil**
0	3	ND	ND
20	3	4.44 ± 0.09	2.91 ± 0.20
40	3	5.07 ± 0.10	3.62 ± 0.10
60	3	5.60 ± 0.03	4.35 ± 0.11
80	3	7.14 ± 0.02	5.26 ± 0.12
100	3	8.79 ± 0.10	7.12 ± 0.06
F-value	18	5541.216	1271.438
Sig.	18	0.000	0.000

หมายเหตุ : ND = non determination (Cd detection limit : 0.01 mg/l)

จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ทั้งหมด ในชุดการทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน อยู่ในช่วง 4.44-8.79 % และในชุดการทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน อยู่ในช่วง 2.91-7.12 % ซึ่งเป็นความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาคผนวก ซ; ตารางที่ ซ-5, ซ-6 และ ซ-9)

เมื่อพิจารณาปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ทั้งหมด (%) กับปริมาณผงกระดูกหมู (รูปที่ 4.12) พบว่า ในทุกระดับความเข้มข้นในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน มีการสะสมแคดเมียมในต้นข้าวน้อยกว่า แสดงว่าสามารถยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมในดินได้มากกว่าชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน



รูปที่ 4.12 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ทั้งหมด (%) กับปริมาณผงกระดูกหมู

ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวเหนียว กข 6 ทั้งหมด (%) แสดงผลดังตารางที่ 4.15

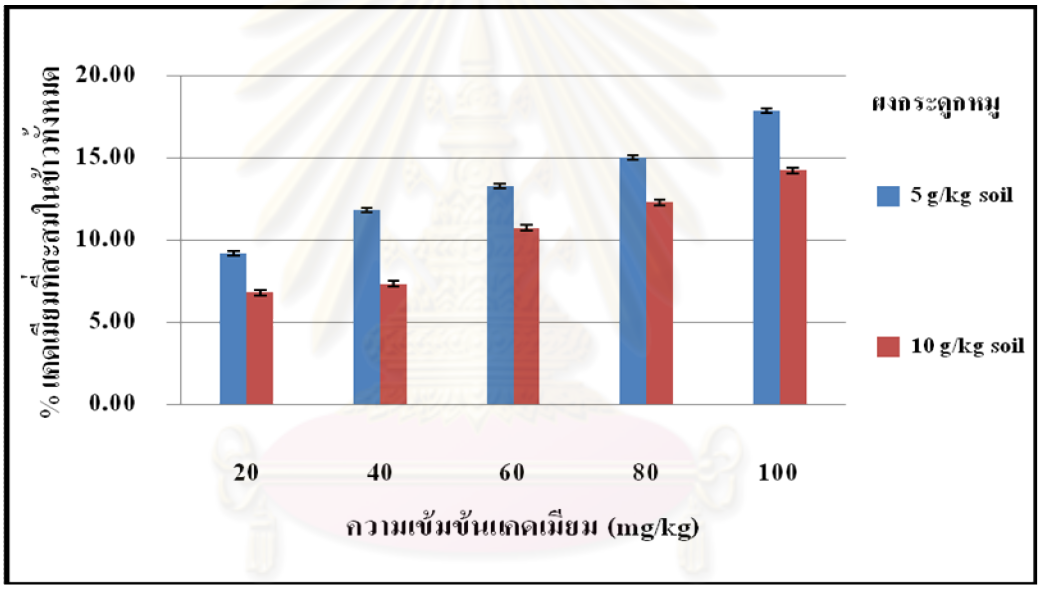
ตารางที่ 4.15 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวเหนียว กข 6

ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg Cd/kg soil)	**N**	**% แคดเมียมในต้นข้าวทั้งหมด**	
		ผงกระดูกหมู 5 g/kg soil	**ผงกระดูกหมู 10 g/kg soil**
0	3	ND	ND
20	3	9.19 ± 0.14	6.83 ± 0.08
40	3	11.86 ± 0.05	7.36 ± 0.01
60	3	13.29 ± 0.06	10.75 ± 0.18
80	3	15.02 ± 0.02	12.29 ± 0.11
100	3	17.87 ± 0.08	14.24 ± 0.04
F-value	18	20864.827	9007.294
Sig.	18	0.000	0.000

หมายเหตุ : ND = non determination (Cd detection limit : 0.01 mg/l)

จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวเหนียว กข 6 ทั้งหมด ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน อยู่ในช่วง 9.19-17.87 % และในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน อยู่ในช่วง 6.83-14.24 % และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าว ทั้งหมด (%)ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาคผนวก ซ; ตารางที่ ซ-7, ซ-8 และ ซ-10)

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวเหนียว กข 6 ทั้งหมด (%) กับปริมาณผงกระดูกหมู (รูปที่ 4.13) พบว่า ในทุกระดับความเข้มข้น ชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน มีการสะสมแคดเมียมในต้นข้าวน้อยกว่า แสดงว่าสามารถยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมในดินได้มากกว่าชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน



รูปที่ 4.13 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวเหนียว กข 6 ทั้งหมด (%) กับปริมาณผงกระดูกหมู

จากผลข้างต้น พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดินมากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 เท่ากับ 4.75-9.08 % และ 3.92-7.12 % ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวสองสายพันธุ์ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาคผนวก ซ; ตารางที่ ซ-11 และซ-12)

4.8.2 ปริมาณแคดเมียมที่เหลือในดิน

ภายหลังเก็บเกี่ยวต้นข้าวแล้วนำดินในกระถางมาคลุกเคล้าให้เข้ากัน เลือกสุ่มตัวอย่างดินมาประมาณ 100 กรัม จากนั้นนำดินไปอบให้แห้ง บดให้ละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดิน (ภาคผนวก ฌ; ตารางที่ ฌ-1 ถึง ฌ-4)

ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 แสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ปริมาณแคดเมียมที่เหลือในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105

ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg Cd/kg soil)	**N**	**ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดิน (mg/kg)**	
		ผงกระดูกหมู 5 g/kg soil	**ผงกระดูกหมู 10 g/kg soil**
0	3	ND	ND
20	3	19.30 ± 0.01	19.40 ± 0.01
40	3	39.07 ± 0.02	39.12 ± 0.01
60	3	58.98 ± 0.01	59.03 ± 0.01
80	3	78.65 ± 0.01	78.71 ± 0.01
100	3	97.98 ± 0.01	97.99 ± 0.01
F-value	18	29201145.064	56143925.431
Sig.	18	0.000	0.000

หมายเหตุ : ND = non determination (Cd detection limit : 0.01 mg/l)

จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเข้มข้นแคดเมียมที่ต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดิน ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาคผนวก ฌ; ตารางที่ ฌ-5, ฌ-6 และ ฌ-9)

ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวเหนียว กข 6 แสดงดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ปริมาณแคดเมียมที่เหลือในดินของข้าวเหนียว กข 6

ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg Cd/kg soil)	**N**	**ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดิน (mg/kg)**	
		ผงกระดูกหมู 5 g/kg soil	**ผงกระดูกหมู 10 g/kg soil**
0	3	ND	ND
20	3	18.95 ± 0.03	19.15 ± 0.01
40	3	38.82 ± 0.01	38.84 ± 0.01
60	3	58.21 ± 0.02	58.46 ± 0.02
80	3	77.58 ± 0.01	77.99 ± 0.01
100	3	96.84 ± 0.01	97.24 ± 0.01
F-value	18	18264700.292	39906202.322
Sig.	18	0.000	0.000

หมายเหตุ : ND = non determination (Cd detection limit : 0.01 mg/l)

จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเข้มข้นแคดเมียมที่ต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดิน ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาคผนวก ฌ; ตารางที่ ฌ-7, ฌ-8 และ ฌ-10)

จากผลข้างต้น พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 มากกว่าข้าวเหนียว กข 6 เนื่องจากข้าวเหนียว กข 6 ดูดดึงแคดเมียมไปสะสมในต้นข้าวมากกว่า และในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน มีแคดเมียมเหลือในดินมากกว่า 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวสองสายพันธุ์ พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน (ภาคผนวก ฌ; ตารางที่ ฌ-11 และฌ-12)

4.8.3 สมดุลมวลของแคดเมียม

สมดุลมวลของแคดเมียม (มิลลิกรัม) เมื่อเริ่มการทดลองและหลังการทดลองปลูกข้าวของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 ในระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ โดยที่ปริมาณแคดเมียมที่ใส่ในกระถางทดลองตอนเริ่มปลูกข้าวเท่ากับ 80, 160, 240, 320, และ400 มิลลิกรัมต่อกระถาง (ที่ระดับความเข้มข้นแคดเมียมที่ 20, 40, 60, 80, และ 100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน) ปริมาณแคดเมียมในต้นข้าวทั้งหมดคิดเทียบเป็นมิลลิกรัมต่อต้น (น้ำหนักแห้ง) และปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินคิดเป็นมิลลิกรัมต่อกระถาง (ภาคผนวก ฌ; ตารางที่ ฌ-1 ถึง ฌ-4)

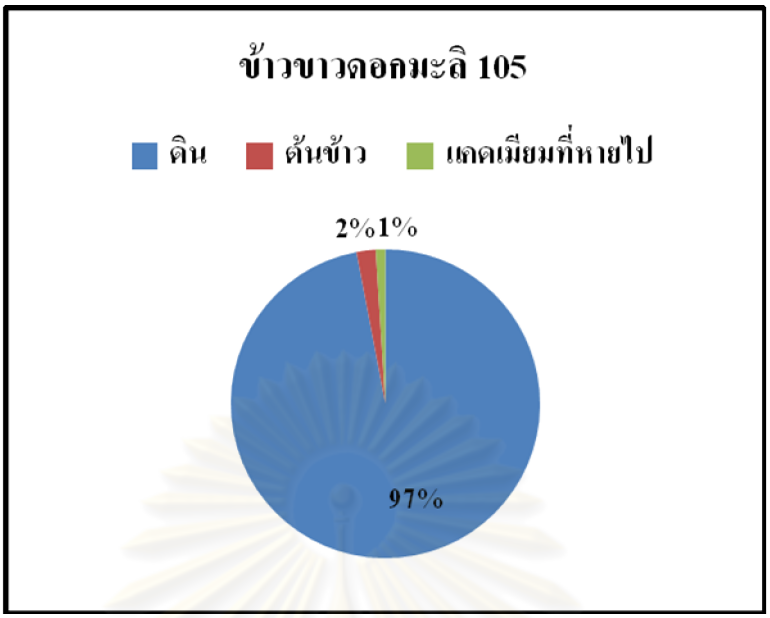
ตารางที่ 4.18 สมดุลมวลของแคดเมียมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน

ปริมาณแคดเมียมที่ใส่ในกระถางตอนเริ่มทดลอง (มิลลิกรัม)	**ปริมาณแคดเมียมภายหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)**			
ชุดทดลองที่มีผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	**ต้นข้าวทั้งหมด**	**ดิน**	**รวม**	**หายไป**
80.00	0.60 ± 0.01	77.19 ± 0.03	77.79	2.21
160.00	1.38 ± 0.03	156.27 ± 0.09	157.65	2.35
240.00	2.28 ± 0.01	235.92 ± 0.05	238.20	1.80
320.00	3.89 ± 0.01	314.59 ± 0.04	318.48	1.52
400.00	5.98 ± 0.07	391.91 ± 0.03	397.89	2.11
ชุดทดลองที่มีผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	**ต้นข้าวทั้งหมด**	**ดิน**	**รวม**	**หายไป**
80.00	0.42 ± 0.03	77.60 ± 0.02	78.02	1.98
160.00	1.04 ± 0.03	156.49 ± 0.03	157.53	2.47
240.00	1.88 ± 0.05	236.11 ± 0.03	237.99	2.01
320.00	3.03 ± 0.07	314.85 ± 0.04	317.88	2.12
400.00	5.13 ± 0.05	391.97 ± 0.05	397.10	2.90

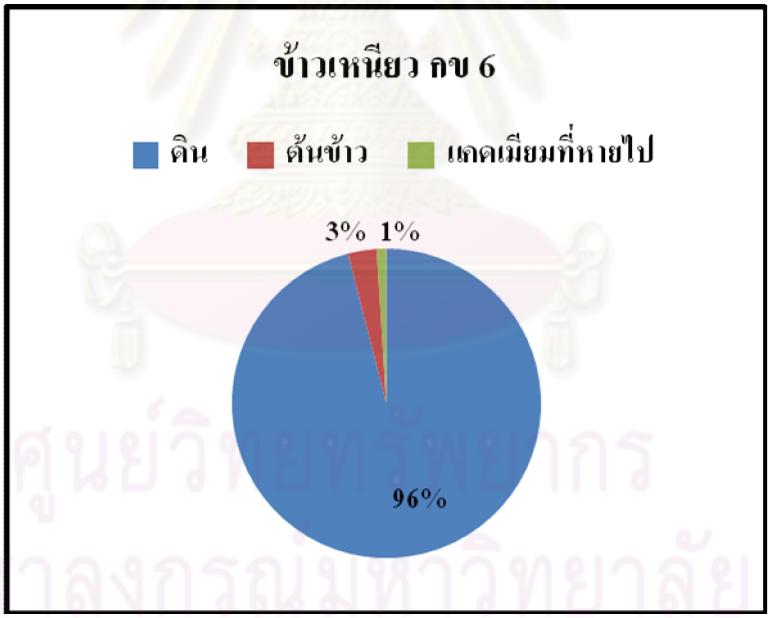
ตารางที่ 4.19 สมดุลมวลของแคดเมียมของข้าวเหนียว กข 6 ในระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน

ปริมาณแคดเมียมที่ใส่ในกระถางตอนเริ่มทดลอง (มิลลิกรัม)	**ปริมาณแคดเมียมภายหลังการทดลอง (มิลลิกรัม)**			
ชุดทดลองที่มีผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	**ต้นข้าวทั้งหมด**	**ดิน**	**รวม**	**หายไป**
80.00	1.10 ± 0.02	75.80 ± 0.10	76.90	3.10
160.00	2.85 ± 0.01	155.29 ± 0.03	158.14	1.86
240.00	4.79 ± 0.02	232.85 ± 0.08	237.64	2.36
320.00	7.21 ± 0.01	310.32 ± 0.04	317.53	2.47
400.00	10.72 ± 0.31	387.35 ± 0.05	398.07	1.93
ชุดทดลองที่มีผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน	**ต้นข้าวทั้งหมด**	**ดิน**	**รวม**	**หายไป**
80.00	0.87 ± 0.01	76.60 ± 0.04	77.47	2.53
160.00	2.84 ± 0.04	155.36 ± 0.06	158.20	1.80
240.00	4.13 ± 0.07	233.83 ± 0.08	237.96	2.04
320.00	6.29 ± 0.06	311.94 ± 0.04	318.23	1.77
400.00	9.11 ± 0.03	388.96 ± 0.03	398.07	1.93

จากการศึกษาสมดุลมวลของแคดเมียม พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 มีปริมาณแคดเมียมหายไปจากตอนเริ่มการทดลอง เท่ากับ 1.52-2.90 มิลลิกรัม และ 1.77-3.10 มิลลิกรัม ตามลำดับ และสัดส่วนแคดเมียม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า มีปริมาณแคดเมียมสะสมในต้นข้าว 2 % ดิน 97 % และแคดเมียมที่หายไป 1 % ส่วนข้าวเหนียว กข 6 พบว่า มีปริมาณแคดเมียมสะสมในต้นข้าว 3 % ดิน 96 % และแคดเมียมที่หายไป 1 % แสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 สัดส่วนแคดเมียมของข้าวขาวดอกมะลิ 105



รูปที่ 4.15 สัดส่วนแคดเมียมของข้าวเหนียว กข 6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาการใช้ผงกระดูกหมูยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินของข้าวสองสายพันธุ์ คือ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของผงกระดูกหมู

ผงกระดูกหมูมีลักษณะพื้นผิวนูนขึ้นคล้ายเป็นปม และมีโพรงระหว่างปม โครงสร้างผลึกมีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ โดยไอออนแคดเมียมส่วนหนึ่งจะเข้าไปแทนที่ไอออนแคลเซียมในผงกระดูกหมู

5.1.2 ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมู

ผงกระดูกหมูที่ 0.02 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมสูงสุด คือ 21.63 มิลลิกรัมต่อกรัม ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์เหมาะสมกว่าแบบฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่า และมีความชันกราฟมากกว่า จึงเป็นระบบดูดซับที่ผิวของสารดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer)

5.1.3 ผลของความเข้มข้นแคดเมียมต่อการเจริญเติบโตของข้าวสองสายพันธุ์

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 สามารถเจริญเติบโตได้ดี ลำต้นเขียว อวบ ใบตั้งตรง ไม่มีโรค และออกรวงในทุกระดับความเข้มข้น คือ 0, 20, 40, 60, 80 และ100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน โดยในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดินจะมีความสูงมากกว่า 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และที่ระดับความเข้มข้นสูงจะเจริญเติบโตช้ากว่าที่ความเข้มข้นต่ำ

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 จะให้ผลผลิตมากกว่าข้าวเหนียว กข 6 โดยข้าวทั้งสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน จะให้ผลผลิตมากกว่าชุดทดลองที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เติมผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น 1.67-3.77% และ 1.30-3.36% ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 พบว่า น้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวลดลง เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมสูงขึ้น

5.1.4 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวสองสายพันธุ์

การสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าว พบว่า ข้าวเหนียว กข 6 มีการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆมากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งข้าวสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน มีการสะสมแคดเมียมในส่วนรากมากที่สุด รองลงมา คือ ลำต้นและใบ ส่วนในเมล็ดข้าวและเปลือกข้าวของข้าวสองสายพันธุ์ ไม่พบแคดเมียม

5.1.5 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมดของข้าวสองสายพันธุ์ (%)

ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวเหนียว กข 6 มากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 เท่ากับ 4.75-9.08 % และ 3.92-7.12 % ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ ข้าวทั้งสองสายพันธุ์ในชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน สามารถยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมในดินได้มากกว่าชุดทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน เนื่องจากมีการสะสมแคดเมียมในต้นข้าวทั้งหมด (%) น้อยกว่า และการดูดดึงแคดเมียมของข้าวสองสายพันธุ์ พบว่า ข้าวเหนียว กข 6 มีการดูดดึงแคดเมียมมากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105

ดังนั้นผงกระดูกหมูจึงสามารถยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินของข้าวสองสายพันธุ์ได้ โดยในเมล็ดข้าวมีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ของสำนักงานอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา คือ 0.2 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมข้าว (ไม่สามารถตรวจวัดแคดเมียมได้ด้วยเครื่อง AAS) จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่จริงได้

ในงานวิจัยนี้ พบว่า ผงกระดูกหมูมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินของข้าวสองสายพันธุ์ โดยที่ข้าวทั้งสองสายพันธุ์ในเมล็ดข้าวและเปลือกข้าว ไม่มีแคดเมียมสะสมในชุดการทดลองที่เติมผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ถ้าจะนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมจะเลือกใช้ผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน เนื่องจากใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าและสามารถยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมไม่ให้เกิดการสะสมในเมล็ดข้าวและเปลือกข้าวได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยการใช้ผงกระดูกหมูยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินของข้าวสองสายพันธุ์ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้

5.2.1 งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการทดลองปลูกข้าวที่ไม่เติมผงกระดูกหมูในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม จึงควรทำการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อจะได้นำมาเปรียบเทียบการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆกับชุดการทดลองที่เติมผงกระดูกหมูที่ 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

5.2.2 วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่จะสามารถนำมาเปรียบเทียบการดูดดึงแคดเมียมระหว่างดินและผงกระดูกหมู เพื่อจะได้ทราบว่าแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินถูกดูดซับไว้โดยดินหรือผงกระดูกหมูมากกว่ากัน

5.2.3 ศึกษาการใช้ผงกระดูกหมูที่มากกว่า 10 กรัมต่อกิโลกรัม เช่น 20, 50, 100 กรัมต่อกิโลกรัมดิน เพื่อดูว่ามีประสิทธิภาพในการยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมในดินดีกว่าหรือไม่

5.2.4 ศึกษาการเตรียมสารดูดซับจากกระดูกหมูแต่ต้มนาน 10 ชั่วโมง หรือ 20 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว และปริมาตรโพรงให้มากขึ้น หรือนำผงกระดูกหมูไปทำให้มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นโดยวิธีทางกายภาพและเคมี

5.2.5 ศึกษาการดูดดึงแคดเมียมในดินของข้าวสายพันธุ์อื่น เพื่อดูพฤติกรรมการดูดดึงแคดเมียมว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่

5.2.6 ศึกษาผลของโลหะอื่นๆที่อยู่ในดิน ซึ่งอาจมีผลต่อการเจริญเติบโตและการดูดดึงแคดเมียมในดิน เช่น สารหนู (Arsenic)

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

การข้าว, กรม. 2551. พันธุ์ข้าว กข 6. [ออนไลน์]. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. แหล่งที่มา: http://www.ricethailand.go.th/rkb/data_002/a1/rice_xx2-03_ricebreed_RD6.html [2551, ตุลาคม 3]

การข้าว, กรม. 2551. พันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105. [ออนไลน์]. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. แหล่งที่มา: http://www.ricethailand.go.th/rkb/data_002/a1/rice_xx2-03_ricebreed_Khao_Dawk_Mali_105.html [2551, ตุลาคม 3]

กรองแก้ว ทิพยศักดิ์ และกลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์. 2547. คู่มือปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม 2. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เกศิณี พกุลานนท์. 2547. การทำให้โลหะหนักจำนวนมากที่ปนเปื้อนในดินเสถียร. เอกสารประกอบการเรียนวิชาสัมมนา สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คนึงนิจ นิชานนท์ และฉันทนา ผดุงทศ. 2548. การจัดการปัญหาผลกระทบต่อสุขภาพจากสิ่งแวดล้อม : กรณีแคดเมียมที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. วารสารส่งเสริมสุขภาพและอนามัยสิ่งแวดล้อม 28 (3): 16-20.

คมสรร ศิริติกุล. 2547. การล้างดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักโดยใช้สารละลายโซเดียมอีดีทีเอ. โครงงานพิเศษสาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ควบคุมมลพิษ, กรม. 2547. การศึกษาการปนเปื้อนของแคดเมียมในพื้นที่ต.แม่ตาวและต.พระธาตุแดง อ.แม่สอด จ.ตาก. กรุงเทพฯ.

จักรพงษ์ แสนชัย. 2548. การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกระดูกกระตุ้นโดยซิงก์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทัศนีย์ อัตตะนันทน์. 2543. ดินใช้ปลูกข้าว. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นงคราญ กาญจนประเสริฐ, พิชัย สราญรมย์, สัมฤทธิ์ ภู่รุ่งเรือง และบุญแสน เตียวนุกูลธรรม. 2546. คู่มือผู้เรียนวิชาปฐพีวิทยา. นครสวรรค์ : สถาบันราชภัฏนครสวรรค์.

นิตยา ตันมณี และจุไร ทองมาก. 2537. การปนเปื้อนของธาตุแคดเมียมในดินในพื้นที่บางแห่งของประเทศไทย. กองวิเคราะห์ดิน กรมพัฒนาที่ดิน. กรุงเทพฯ. (อัดสำเนา)

ประพิศ แสงทอง และพิชิต พงษ์สกุล. 2547. การปนเปื้อนของโลหะหนักในดินและพืชอาหารในประเทศไทย. วารสารดินและปุ๋ย 26: 31-36

ประรัชกรณ์ สาธิตคุณ. 2546. การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานเสื่อกกโดยใช้ซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปศุสัตว์, กรม. 2550. จำนวนสุกรที่อนุญาตให้ฆ่าเป็นอาหารแสดงเป็นรายเดือนปี พ.ศ. 2550. ฝ่ายประมวลผลและสถิติ กองแผนงาน. กรุงเทพฯ.

ปรีดา พากเพียร, อภิสิทธิ์ เอี่ยมหน่อ, ไฮน์ เอ็กการ์ด และธวัชชัย ณ นคร. 2541. โลหะหนัก แหล่งที่มา ค่ามาตรฐานและการทำปฏิกิริยากับดิน. วารสารดินและปุ๋ย 20 (2): 41-49.

พัฒนาที่ดิน, กรม : สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน. 2548. คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อนตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ.

พิชิต พงษ์สกุล. 2545. ผลการดำเนินงานชุดโครงการวิจัยสารปนเปื้อนในดิน น้ำ และพืช, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการประจำปี 2545. หน้า127-133. กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ.

พรอำภา สุรภักดี. 2549. การกำจัดแคดเมียมและสังกะสีโดยพืชตัดดอก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มูลนิธิข้าวไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2551. รู้เรื่องข้าว. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

มูลนิธิข้าวไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2551. ชนิดของข้าว. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.thairice.org/html/aboutrice/about_rice2.htm [2551, ตุลาคม 2]

ยุพดี เสตพรรณ. 2544. ชีวิตกับสิ่งแวดล้อม. คณะมนุษยศาสตร์และสังคม สถาบันราชภัฏเพชรบุรีวิทยาลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์. ปทุมธานี.

วิกิพีเดียสารานุกรมเสรี. 2551. ข้าว. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%82%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%A7#.E0.B8.94.E0.B8.B9.E0.B9.80.E0.B8.9E.E0.B8.B4.E0.B9.88.E0.B8.A1 [2551, ตุลาคม 2]

วรรณา โฆสิตะมงคล. 2538. การเพิ่มความแข็งแรงของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เตรียมจากกระดูกวัว ควายโดยการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงอัดที่ผิวหน้า. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศุภกิจ พัฒนเตชะ. 2545. การใช้ถ่านกระดูกกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2538. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2540. ภาวะมลพิษของดิน. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์รวมชาวฟาร์มปศุสัตว์. 2551. ประวัติของการเลี้ยงสุกร. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.thaifeed.net/animal/swine/swine-1.html [2551, ตุลาคม 10]

ศูนย์รวมชาวฟาร์มปศุสัตว์. 2551. การฆ่าสุกร. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.thaifeed.net/animal/swine/swine-14.html [2551, ตุลาคม 10]

สรัตนา เสนาะ. 2548. การดูดดึงธาตุโลหะหนักของหญ้าแฝก ทานตะวัน และข้าว ที่ปลูกในดินปนเปื้อน สังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯเล่ม 3. 2551. ลักษณะที่สำคัญของข้าว. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK3/chapter1/t3-1-l1.htm#sect1 [2551, ตุลาคม 3]

สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯเล่ม 3. 2551. ลักษณะของข้าวที่สำคัญทางการเกษตร. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK3/chapter1/t3-1-l1.htm#sect5 [2551, ตุลาคม 3]

สุดารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์. 2551. การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมด้วยสารดูดซับจากกระดูกหมู. วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุชาดา สุทธิพิบูลย์. 2547. ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและอาร์เซนิกในน้ำเสียด้วยถ่านกระดูก วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุธิลา ตุลยะเสถียร, โกศล วงศ์สวรรค์ และสถิต วงศ์สวรรค์. 2544. มลพิษสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัทรวมสาส์น.

สุรสิทธิ์ อรรถจารุสิทธิ์. 2542. การประเมินการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนักในดิน. วารสารดินและปุ๋ย 23 (1): 29-37.

อรรณพ หอมจันทร์. 2544. เอกสารประกอบการสอนวิชาพิษวิทยาสิ่งแวดล้อม. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. (อัดสำเนา)

อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ. 2544. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกระดูกสัตว์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Alloway, B.J. 1995. Soil process and behavior of heavy metals: Heavy metals in soil. 2 nd ed. New York: Blackie and Professional.

Asami, T. 1997. Cadmium pollution of paddy field and human health in land, pp.217-264, In D.C. Adriano et al., eds. Biogeochemistry of Trace Metals. Science Review, Northwood.

Azab, M.S. and Peterson, P.J. 1989. The Removal Cadmium from water by the use of Biological Sorbents. Water Sci Tech. 21: 1705-1706.

Balestrasse, K.B., Maria, B.P., Susana, G.M. and Maria, T.L. 2003. Effect of Cadmium Stress on Metabolism in Nodules and Root of Soybean Plants. Functional Plant Biology. 30:57-64.

Carter, M.R. Soil Sampling and Methods of Analysis, USA, Lewis Publishers, Florida, 1993. Jimmy J, Street, W.L.Lindsay, and B.R. Sabey1977. Solubility and plant uptake of cadmium in soils amends with cadmium and sewage sludge. Environmental Quality. 6(1):72-77

Chan-Jun, M. and Jung-hoen, L. 2005. Use of Curdlan and activated carbon composed adsorbents for heavy metal removal. Process Biochemistry 40: 227-229.

Chanthachot, W., Busamongkol, A., Khuntong, S., Peripart, R., and Loaharojanapanal, S. 2005. Analysis of heavy metals in soil along Mae Tao River, Tak province by neuclear technique. In 31st Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology, 18-20 October 2005, pp. 130-133. Thailand: Nakhon Rachasima, Suranaree University of Technology.

Chen, Z.S. 1992. Metal contamination of flooded soils, rice plants and surface water in Asia, pp.85-109, In D.C. Adriano et al., eds. Biogeochemistry of Trace Metals. Lewis Publ., London.

Cheung, G.W., Chan, C.K., Porter, J.F. and Mckay, G. 2001. Fikm-Pore Diffusion control for the Batch sorption of cadmium ions from effluent onto bone char . J. of Colloid and Interface Science 234 : 328-336.

Cunningham, S.D., Anderson, T.A., Schwab, A.P., and Hsu, F.C. 1996. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. Advances in Agronomy 56: 55-114.

David, R.L. 2004. Handbook of Chemistry and Physics. 84th ed. England : CRC press, pp. 12-14, 12-15.

Faisal, I.K., Tahil, H., and Hejazi, R. 2004. An overview and analysis of site remediation technologies. Journal of Environmental Management 71: 95-122.

Green, E.C., Chaney, I. and Rufus, B.J. 2002. Interaction Between Cadmium Uptake and Phytotoxic Zine Levels in Rice Using Chelator-Buffered Nutrient Solution. Available from: http://www.nal.usda.gov/ttic/tektran/datd/000011/91/0000119124.html [2002, January 1]

Hawley, G., 1983. The Condensed Chemical Dictionary. Tenth ed. Taiwan : Mei Ya Taipei Press.

Huang, J.W. and Cunningham, S.D. 1996. Lead Phytoextraction Species Variation Lead Uptake and Translocation. J. New Physiologist 134: 75-84.

Hutchinson, J.J., Young, S.D., McGrath, S.P., West, H.M., Black, C.R. and Baker, A.J. 2000. Determining uptake of "non-labile" soil cadmium by *Thlapi caerulescens* using isotopic dilution techniques. J. New Physiologist 146: 453-460.

International Environmental Technology Centre. 2000. Phytoremediation : An environmentally sound technology for pollution prevention, control and remediation an introduction guide to decision-makers [Online]. USA: United Nations Environment Programme [UNEP], Division of Technology, Industry and Economics. Available from: http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/Freshwater/FMS2/index.asp [2003, December 3]

John, H. 1978. Uptake of soil applied cadmium and its distribution in radishes. Can. J. Plant Sci. 52: 715-719.

Kadirvelu, K., Thamaraiselvi, K. and Namasivayam, C. 2001. Removal of heavy metals from industrial waste waters by adsorption on to activated carbon prepared from an agricultural solid waste. Bioresource Technology 76(1): 63-65.

Ko, D.C.K., Cheung, C.W., Choy, K.K.H., Porter, J.F. and Mckay, G., 2004. Sorption equilibria of metal ions on bone char. Chemosphere 54 :273-281.

Lurtwitayapont, S. and Srisatit, T. 2010. Comparison of Lead Removal by Various Types of Swine Bone Adsorbents. The international journal published by the Thai Society of Higher Education Institutes on Environment. 3(1):32-38.

McCutcheon, S.C. and Schnoor, J.L. 2003. Overview of phytotransformation and control of wastes. In McCutcheon, S.C. and Schnoor, J.L. (eds.), Phytoremediation : Transformation and Control of Contaminants, pp. 3-58. New Jerey: John Wiley & Sons.

Min, S., Han, H.J.S., Shin, E.W. and Park, J.K. 2004. Improvement of Cadmium ion removal by base treatment of juniper fiber. Water Research 38 :1289-1295.

Mjengera, H. and Mkongo, G. 2003. Appropriate defluoridation technology for use in fluorotic areas in Tanzania. Physics and Chemistry of the Earth 28 : 1097-1104.

Moolenarr, S.W. and Beltrami, P. 1998. Heavy Metal Blances of Italian Soil as Affected by Sewage Sludge and Bordeaux Mixture Applications. J. Environ. Qual. 27: 828-835.

Simmons, R.W., Pongsakul, P., Chaney, R.L., Saiyasitpanich, D., Kliphoklap, S. and Nobutou, W. 2003. The relative exclusion of zine and iron and from rice grain in reaction in reaction rice grain cadmium as compared to soybean: implications for human health. Plant and Soil. 257:163-170.

Siriporndulsil, S., Traina, S., Verma, S.P. and Sayre, R.T. 2002. Molecular Mechanism of Proline-Mediated Tolerance to Toxic Heavy Metals in Transenic Microalgae. The plant Cell. 14: 2837-2847.

Somboon, P., 1999. Distribution of Cadmium and Zinc in Soil from Zinc Mining Activity: a Case Study of Zinc Mine, Mae Sot District, Tak Province. Master's thesis, Technology of Environmental Planning for Rural Development, Graduate Studies, Mahidol University.

Sriprachote, A. 2007. Distribution of Cadmium in contaminated soil. Master's thesis, Inter-department of environmental Science, Graduate School, Chulalongkorn University.

Sustainable Strategies. 1997. Phytoremediation [Online]. Available from: http://www.ecological-engineering.com/phytorem.html [2003, October 16]

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
วิธีคำนวณปริมาณแคดเมียมในดิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณปริมาณแคดเมียมในดิน

การทดลองจะใช้ $Cd(NO_3)_2.4H_2O$ ผสมลงไปในดิน ที่ความเข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมของดิน ซึ่งการทดลองนี้จะใช้ดิน 4 กิโลกรัมต่อกระถาง มีวิธีคำนวณปริมาณแคดเมียมที่ใส่ในดิน ดังนี้

ปริมาณของ $Cd(NO_3)_2.4H_2O$

$$= \frac{\text{น้ำหนักดิน (kg) x ความเข้มข้นแคดเมียม (mg/kg) x น้ำหนักโมเลกุล } Cd(NO_3)_2.4H_2O \text{ (g)}}{\text{น้ำหนักโมเลกุลแคดเมียม (g)}}$$

โดยที่ น้ำหนักโมเลกุลของแคดเมียม = 112.41 g

น้ำหนักโมเลกุลของ $Cd(NO_3)_2.4H_2O$ = 308.41 g

ตัวอย่าง ความเข้มข้นแคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดิน 4 กิโลกรัมต่อกระถาง ต้องใช้ปริมาณ $Cd(NO_3)_2.4H_2O$ เท่าไร

วิธีทำ

$$\text{ปริมาณ } Cd(NO_3)_2.4H_2O = \frac{4 \times 20 \times 308.41}{112.41} \text{ mg}$$

$$= 219.489 \text{ mg}$$

$$= 0.219489 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องใช้ปริมาณ $Cd(NO_3)_2.4H_2O$ เท่ากับ 0.219489 กรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมู

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยผงกระดูกหมู 0.02 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างกัน

เวลาสัมผัส	pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่เหลืออยู่ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด
blank	5.00	5.00	10.000	0.000	0.00
0.5 ชั่วโมง	5.00	5.01	8.583	1.417	14.17
1 ชั่วโมง	5.00	5.02	6.422	3.578	35.78
4 ชั่วโมง	5.00	5.04	5.015	4.985	49.85
8 ชั่วโมง	5.00	5.08	2.846	7.154	71.54
24 ชั่วโมง	5.00	5.05	1.665	8.335	83.35
36 ชั่วโมง	5.00	5.04	1.424	8.576	85.76
48 ชั่วโมง	5.00	5.05	1.302	8.698	86.98
72 ชั่วโมง	5.00	5.07	1.348	8.652	86.52

หมายเหตุ ปริมาณสารละลายแคดเมียมเริ่มต้น = 50 มิลลิลิตร
ความเร็วของการเขย่า = 175 รอบต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกหมู 0.02 กรัม

เวลาสัมผัส	pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่เหลืออยู่ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด	ประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
blank	5.00	5.00	10.000	0.000	0.00	0.00
0.5 ชั่วโมง	5.00	5.01	8.583	1.417	14.17	3.54
1 ชั่วโมง	5.00	5.02	6.422	3.578	35.78	8.95
4 ชั่วโมง	5.00	5.04	5.015	4.985	49.85	12.46
8 ชั่วโมง	5.00	5.08	2.846	7.154	71.54	17.89
24 ชั่วโมง	5.00	5.05	1.665	8.335	83.35	20.84
36 ชั่วโมง	5.00	5.04	1.424	8.576	85.76	21.44
48 ชั่วโมง	5.00	5.05	1.302	8.698	86.98	21.75
72 ชั่วโมง	5.00	5.07	1.348	8.652	86.52	21.63

หมายเหตุ ปริมาณสารละลายแคดเมียมเริ่มต้น = 50 มิลลิลิตร

ความเร็วของการเขย่า = 175 รอบต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกหมู 0.02 กรัม

เวลา สัมผัส	pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่เหลืออยู่ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละ การกำจัด	ประสิทธิภาพ การกำจัด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
blank	5.00	5.00	20.000	0.000	0.00	0.00
0.5 ชั่วโมง	5.00	5.01	19.213	0.787	3.94	1.97
1 ชั่วโมง	5.00	5.04	18.685	1.315	6.58	3.29
4 ชั่วโมง	5.00	5.05	18.498	1.502	7.51	3.76
8 ชั่วโมง	5.00	5.05	18.012	1.988	9.94	4.97
24 ชั่วโมง	5.00	5.08	17.667	2.333	11.67	5.83
36 ชั่วโมง	5.00	5.04	17.308	2.692	13.46	6.73
48 ชั่วโมง	5.00	5.05	15.441	4.559	22.80	11.40
72 ชั่วโมง	5.00	5.06	15.286	4.714	23.57	11.79

หมายเหตุ ปริมาณสารละลายแคดเมียมเริ่มต้น = 50 มิลลิลิตร
ความเร็วของการเขย่า = 175 รอบต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกหมู 0.02 กรัม

เวลาสัมผัส	pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่เหลืออยู่ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด	ประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
blank	5.00	5.00	30.000	0.000	0.00	0.00
0.5 ชั่วโมง	5.00	5.03	29.125	0.875	2.92	2.19
1 ชั่วโมง	5.00	5.03	28.769	1.231	4.10	3.08
4 ชั่วโมง	5.00	5.02	28.621	1.379	4.60	3.45
8 ชั่วโมง	5.00	5.04	27.492	2.508	8.36	6.27
24 ชั่วโมง	5.00	5.04	26.887	3.113	10.38	7.78
36 ชั่วโมง	5.00	5.05	26.213	3.787	12.62	9.47
48 ชั่วโมง	5.00	5.07	25.918	4.082	13.61	10.21
72 ชั่วโมง	5.00	5.08	25.747	4.253	14.18	10.63

หมายเหตุ ปริมาณสารละลายแคดเมียมเริ่มต้น = 50 มิลลิลิตร

ความเร็วของการเขย่า = 175 รอบต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยผงกระดูกหมู 0.02 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัส 0.5-72 ชั่วโมง

เวลาสัมผัส	pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่เหลืออยู่ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด	ประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
blank	5.00	5.00	10.000	0.000	0.00	0.00
0.5 ชั่วโมง	5.00	5.01	8.583	1.417	14.17	3.54
1 ชั่วโมง	5.00	5.02	6.422	3.578	35.78	8.95
4 ชั่วโมง	5.00	5.04	5.015	4.985	49.85	12.46
8 ชั่วโมง	5.00	5.08	2.846	7.154	71.54	17.89
24 ชั่วโมง	5.00	5.05	1.665	8.335	83.35	20.84
36 ชั่วโมง	5.00	5.04	1.424	8.576	85.76	21.44
48 ชั่วโมง	5.00	5.05	1.302	8.698	86.98	21.75
72 ชั่วโมง	5.00	5.07	1.348	8.652	86.52	21.63

หมายเหตุ ปริมาณสารละลายแคดเมียมเริ่มต้น = 50 มิลลิลิตร

ความเร็วของการเขย่า = 175 รอบต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-6 ผลการทดลองกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยผงกระดูกหมู 0.05 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัส 0.5-72 ชั่วโมง

เวลาสัมผัส	pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่เหลืออยู่ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด	ประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
blank	5.00	5.00	10.000	0.000	0.00	0.00
0.5 ชั่วโมง	5.00	5.00	8.131	1.869	18.69	1.87
1 ชั่วโมง	5.00	5.01	5.248	4.752	47.52	4.75
4 ชั่วโมง	5.00	5.02	4.022	5.978	59.78	5.98
8 ชั่วโมง	5.00	5.06	2.867	7.133	71.33	7.13
24 ชั่วโมง	5.00	5.04	1.521	8.479	84.79	8.48
36 ชั่วโมง	5.00	5.04	1.305	8.695	86.95	8.70
48 ชั่วโมง	5.00	5.03	1.282	8.718	87.18	8.72
72 ชั่วโมง	5.00	5.05	1.201	8.799	87.99	8.80

หมายเหตุ ปริมาณสารละลายแคดเมียมเริ่มต้น = 50 มิลลิลิตร

ความเร็วของการเขย่า = 175 รอบต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-7 ผลการทดลองกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยผงกระดูกหมู 0.10 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัส 0.5-72 ชั่วโมง

เวลาสัมผัส	pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่เหลืออยู่ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด	ประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
blank	5.00	5.00	10.000	0.000	0.00	0.00
0.5 ชั่วโมง	5.00	5.02	6.197	3.803	38.03	1.90
1 ชั่วโมง	5.00	5.02	5.075	4.925	49.25	2.46
4 ชั่วโมง	5.00	5.01	2.798	7.202	72.02	3.60
8 ชั่วโมง	5.00	5.01	1.521	8.479	84.79	4.24
24 ชั่วโมง	5.00	5.03	1.246	8.754	87.54	4.38
36 ชั่วโมง	5.00	5.04	1.192	8.808	88.08	4.40
48 ชั่วโมง	5.00	5.05	1.162	8.838	88.38	4.42
72 ชั่วโมง	5.00	5.08	1.024	8.976	89.76	4.49

หมายเหตุ ปริมาณสารละลายแคดเมียมเริ่มต้น = 50 มิลลิลิตร

ความเร็วของการเขย่า = 175 รอบต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-8 ผลการทดลองกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยผงกระดูกหมู 0.50 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัส 0.5-72 ชั่วโมง

เวลาสัมผัส	pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่เหลืออยู่ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด	ประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
blank	5.00	5.00	10.000	0.000	0.00	0.00
0.5 ชั่วโมง	5.00	5.00	4.785	5.215	52.15	0.52
1 ชั่วโมง	5.00	5.01	3.848	6.152	61.52	0.62
4 ชั่วโมง	5.00	5.01	2.945	7.055	70.55	0.71
8 ชั่วโมง	5.00	5.02	2.319	7.681	76.81	0.77
24 ชั่วโมง	5.00	5.06	1.168	8.832	88.32	0.88
36 ชั่วโมง	5.00	5.08	0.649	9.351	93.51	0.94
48 ชั่วโมง	5.00	5.04	0.612	9.388	93.88	0.94
72 ชั่วโมง	5.00	5.06	0.506	9.494	94.94	0.95

หมายเหตุ ปริมาณสารละลายแคดเมียมเริ่มต้น = 50 มิลลิลิตร

ความเร็วของการเขย่า = 175 รอบต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-9 ผลการทดลองกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยผงกระดูกหมู 0.80 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัส 0.5-72 ชั่วโมง

เวลาสัมผัส	pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่เหลืออยู่ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด	ประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
blank	5.00	5.00	10.000	0.000	0.00	0.00
0.5 ชั่วโมง	5.00	5.01	3.514	6.486	64.86	0.41
1 ชั่วโมง	5.00	5.02	2.820	7.180	71.80	0.45
4 ชั่วโมง	5.00	5.01	1.934	8.066	80.66	0.50
8 ชั่วโมง	5.00	5.02	1.306	8.694	86.94	0.54
24 ชั่วโมง	5.00	5.03	0.881	9.119	91.19	0.57
36 ชั่วโมง	5.00	5.05	0.427	9.573	95.73	0.60
48 ชั่วโมง	5.00	5.05	0.285	9.715	97.15	0.61
72 ชั่วโมง	5.00	5.08	0.194	9.806	98.06	0.61

หมายเหตุ ปริมาณสารละลายแคดเมียมเริ่มต้น = 50 มิลลิลิตร
ความเร็วของการเขย่า = 175 รอบต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-10 ผลการทดลองกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยผงกระดูกหมู 1.20 กรัม ที่ระยะเวลาสัมผัส 0.5-72 ชั่วโมง

เวลาสัมผัส	pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่เหลืออยู่ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้น Cd^{2+} ที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด	ประสิทธิภาพการกำจัด (มิลลิกรัมต่อกรัม)
blank	5.00	5.00	10.000	0.000	0.00	0.00
0.5 ชั่วโมง	5.00	5.00	1.725	8.275	82.75	0.34
1 ชั่วโมง	5.00	5.01	1.505	8.495	84.95	0.35
4 ชั่วโมง	5.00	5.02	1.331	8.669	86.69	0.36
8 ชั่วโมง	5.00	5.01	1.047	8.953	89.53	0.37
24 ชั่วโมง	5.00	5.02	0.552	9.448	94.48	0.39
36 ชั่วโมง	5.00	5.03	0.317	9.683	96.83	0.40
48 ชั่วโมง	5.00	5.07	0.248	9.752	97.52	0.41
72 ชั่วโมง	5.00	5.09	0.109	9.891	98.91	0.41

หมายเหตุ ปริมาณสารละลายแคดเมียมเริ่มต้น = 50 มิลลิลิตร

ความเร็วของการเขย่า = 175 รอบต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-11 ผลการทดลองไอโซเทอมการกำจัดแคดเมียม (Cd^{2+}) ความเข้มข้น10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกหมู ที่ระยะเวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง

m	C_0	C_e	x	x/m	1/ x/m	1/Ce	Log x/m	Log Ce
0.02	10.000	1.348	8.652	21.630	0.046	0.742	1.335	0.130
0.05	10.000	1.201	8.799	8.800	0.114	0.833	0.944	0.080
0.10	10.000	1.024	8.976	4.490	0.223	0.977	0.652	0.010
0.50	10.000	0.506	9.494	0.950	1.053	1.976	-0.022	-0.296
0.80	10.000	0.194	9.806	0.620	1.613	5.155	-0.208	-0.712
1.20	10.000	0.109	9.891	0.410	2.439	9.174	-0.387	-0.963

หมายเหตุ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมที่เหลืออยู่ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

x = ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

m = ปริมาณผงกระดูกหมู (กรัม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค
วิธีวิเคราะห์สมบัติดิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. การวัดค่าพีเอช

1. ชั่งดินแห้ง 5 กรัม ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นลงไป 5 มล. พร้อมบันทึกหมายเลขตัวอย่างดิน
2. กวนให้เข้ากันอย่างน้อย 5 วินาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
3. ขณะที่ตั้งสารละลายทิ้งไว้ ให้ทำการปรับเทียบเครื่องวัดพีเอช กับสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน 4 และ 7 จุ่มอิเลคโทรดลงในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายดินที่ครบตามเวลากวน โดยใช้การหมุนอิเล็กโทรดเบาๆ อ่านค่าพีเอช

2. การวิเคราะห์ความเป็นกรดของดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548)

1. ชั่งดิน 5-10 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มล.
2. เติม(สารละลายแบเรียมคลอไรด์ 0.5 นอร์มอลและไตรเอทานอลามีน 0.055 นอร์มอล) 50 มล. ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 1 คืน
3. กรองแบบลดความดันและล้างดินด้วยแบเรียมคลอไรด์ไตรเอทานอลามีน 2-3 ครั้ง เทสารละลายที่กรองได้ใส่ขวดวัดปริมาตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มล. ด้วยสารละลายแบเรียมคลอไรด์ไตรเอทานอลามีน
4. เทสารละลายดินที่กรองได้ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มล. ล้างขวดด้วยน้ำกลั่นเล็กน้อย เติมอินดิเคเตอร์ผสม 4-5 หยด จะได้สารละลายสีเขียว
5. ทำการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดไฮโดรคลอริคก่อน (ให้ได้ความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ถ้าไม่ใกล้เคียงกับ 0.2 นอร์มอล ต้องเตรียมใหม่
6. ทำแบลงค์ เช่นเดียวกับตัวอย่างดิน บันทึกปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริคมาตรฐาน 0.2 นอร์มอล ที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลายดินและแบลงค์ (สารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีชมพูม่วงที่จุดยุติ)
7. คำนวณหาความเป็นกรดของดิน

<u>การคำนวณ</u>

ความเป็นกรดของดิน $= \frac{(B-S)\times N\times 100}{X}$ meq / g dry soil ……...….(1)

เมื่อ N = ความเข้มข้นของ HCl (นอร์มอล)

B = ปริมาตรของ HCl ที่ใช้ในการไทเทรตกับแบลงค์ (มล.)

S = ปริมาตรของ HCl ที่ใช้ในการไทเทรตกับตัวอย่างดิน(มล.)

X = น้ำหนักของดิน (กรัม)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. การหาความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (กรองแก้ว ทิพยศักดิ์ และกลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์, 2547)

1. ชั่งตัวอย่างดิน 5-10 กรัม (ละเอียดสองตำแหน่งทศนิยม) ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มล. เติมสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท 1 นอร์มอล ลงไป 60 มล. ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน
2. เขย่าสารละลายดิน 30 นาที โดยใช้เครื่องเขย่า จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงนาน 5 นาที แยกเอาส่วนใสทิ้ง
3. ล้างดินด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท 1 นอร์มอล ครั้งละ 30 มล. นำไปปั่นเหวี่ยงแยกเอาส่วนใสออกจนไม่มีแคลเซียมเหลืออยู่ (การทดสอบแคลเซียมทำได้โดยนำส่วนใสที่ได้จากการล้างแต่ละครั้ง ประมาณ 10 มล. ใส่หลอดทดลอง หยดแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 นอร์มอล, แอมโมเนียมออกซาเลต 10 % และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 50 % อย่างละ 2-3 หยด นำไปต้มให้เดือด ถ้าตะกอนหรือสารละลายขุ่น แสดงว่ามีแคลเซียมตกค้างอยู่ต้องล้างดินด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตตต่อไปอีก)
4. ล้างตัวอย่างดินต่อด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.25 นอร์มอล อีก 1 ครั้ง จากนั้นล้างด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 7 ครั้ง ๆ ละ 30 มล. โดยในการล้างแต่ละครั้งให้นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงนาน 3-5 นาที เพื่อแยกส่วนใสออกจนไม่มีคลอไรด์เหลืออยู่ในดิน ใช้หลอดหยดดูดเฉพาะส่วนที่ใสมาใส่ภาชนะอื่นเพื่อทดสอบคลอไรด์ การทดสอบคลอไรด์ทำโดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.1 นอร์มอล 2-3 หยดลงในสารละลายส่วนที่ใสจากการปั่นเหวี่ยง ถ้ามีตะกอนสีขาวของซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) เกิดแสดงว่ายังมีคลอไรด์เหลืออยู่ ต้องล้างดินด้วยแอมโมเนียมคลอไรด์ต่อไป
5. นำสารละลายที่ได้จากข้างต้นทิ้งไป นำดินที่ได้มาล้างต่อด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 10 % เพื่อไล่แอมโมเนียมไอออนในดิน โดยล้างครั้งละ 30 มล. ซ้ำ 3 ครั้ง นำไปปั่นเหวี่ยง (เก็บส่วนใสไว้)
6. นำส่วนใสที่ได้จากสารละลายดินมาใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มล. ปรับปริมาตรรวมด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มล.
7. นำสารละลายที่ได้ไปกลั่น เพื่อไล่แอมโมเนียออกมาโดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 % ลงไป 25 มล. ใส่ในขวดกลั่นเจห์ดาลโดยใช้ปลายคอนเดนเซอร์จุ่มอยู่ในสารละลายกรดบอริค 3 % จำนวน 50 มล. ซึ่งใส่อินดิเคเตอร์ผสมไว้ 2-3 หยด กลั่นจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วง เป็นสีเขียว ขณะกลั่นควรตรวจสอบว่าน้ำหล่อเย็นที่เข้าและออก ช่วยดักให้ก๊าซแอมโมเนียกลั่นตัวได้ดีหรือไม่ ถ้าอุณหภูมิน้ำออกและที่ใช้ภาชนะที่ใส่สารละลายกรดบอริคสูงมากจะไม่สามารถจับก๊าซแอมโมเนียด้วยกรดบอริคได้สมบูรณ์ ควรใช้น้ำแข็งหล่อเย็นรอบ ๆ ภาชนะที่ใส่สารละลายกรดบอริคด้วย

8. นำสารละลายที่ได้จากการกลั่นไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง
9. กลั่นแบลงค์ และไทเทรตเช่นเดียวกับตัวอย่างดิน

<u>การคำนวณ</u>

CEC = $\frac{[(A-B)N \times 100]}{X}$ มิลลิกรัมสมมูลต่อดิน .....(2)

เมื่อ A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริคมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (มล.)

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริคมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลงค์

N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริคมาตรฐาน (นอร์มอล)

X = น้ำหนักเป็นกรัมของตัวอย่างดิน

4. การหาค่าความชื้น (Carter, 1993)

1. ชั่งกระจกนาฬิกาที่สะอาด
2. นำตัวอย่างดินมาชั่ง 10 กรัม ลงบนกระจกนาฬิกาจดบันทึกน้ำหนักเปียก
3. นำไปเข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์
4. นำมาชั่งน้ำหนักแห้ง
5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น
   % ความชื้น = [(น้ำหนักเปียก-น้ำหนักแห้ง) x 100] / น้ำหนักเปียก .....(3)
6. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย

5. การหาลักษณะเนื้อดิน (กรองแก้ว ทิพยศักดิ์ และกลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์, 2547)

<u>การปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์</u>

1. เทสารละลายคัลกอน ปริมาตร 100 มล. ลงในกระบอกตวงปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1.0 ลิตร ผสมให้ทั่วด้วยแท่งแก้วคนแบบ plunger ตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่ (อยู่ในช่วง 20-25 องศาเซลเซียส)
2. ค่อย ๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงในสารละลายอย่างระมัดระวัง อ่านค่าจากสเกลที่รอยเว้าบนของ ของเหลวที่ล้อมรอบไฮโดรมิเตอร์

การอ่านค่าจากสารแขวนลอย

1. ชั่งดินที่ผึ่งแห้งและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.2 มิลลิเมตร แล้ว 40 กรัม (ถ้าเป็นดินทรายร่วนหรือดินทรายใช้ 100 กรัม) ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มล. เติมสารละลายคัลกอน 100 มล. และน้ำประมาณ 300 มล. ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน
2. ชั่งดินตัวอย่างเดิมอีก 10 กรัม เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น และน้ำหนักแห้งแล้วนำไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1 คืน แล้วทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์และชั่งน้ำหนัก
3. นำสารแขวนลอยดินจากข้อ 1 มากวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กประมาณ 5 นาที แล้วเทลงกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร
4. ปรับปริมาตรสารในข้อ 3 ด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด 1 ลิตร ทิ้งไว้จนอุณหภูมิคงที่
5. จุ่มแท่งแก้วคนแบบ plunger แบบขึ้น-ลง เบา ๆ เพื่อให้เกิดการผสมกันอย่างทั่งทั้งกระบอกตวง (ให้หมุนขึ้นลงแบบเกลียวสว่าน 2-3 รอบ) บันทึกเวลาเมื่อคนเสร็จ (เติม 1 หยดของเอทิลแอลกอฮอล์ ถ้าที่ผิวของสารแขวนลอยเป็นฟอง)
6. ค่อย ๆ หย่อนไฮโดรมิเตอร์ลงอย่างระมัดระวังในสารแวนลอยและอ่านสเกลเหมือนหัวข้อการปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์ เมื่อเวลาผ่านไป 40 วินาที หลังจากการกวนผสม ค่าที่อ่านได้ควรหักลบจากค่าที่อ่านได้จากการปรับเทียบไฮโดรมิเตอร์
7. ค่อย ๆ ดึงไฮโดรมิเตอร์ขึ้นอย่างระมัดระวังเมื่ออ่านเสร็จ ล้างและเช็ดให้แห้ง
8. เมื่อครบ 2 ชั่วโมง ให้อ่านค่าไฮโดรมิเตอร์อีกครั้งโดยทำเหมือนข้อ 6 และ 7

การคำนวณ

$$\% \text{ Sand} = [(W - R_{40S}) \times 100] / W \quad \text{.....(4)}$$

$$\% \text{ Clay} = [(R_{2hr}) \times 100] / W \quad \text{.....(5)}$$

$$\% \text{ Silt} = 100 - (\%\text{Sand} + \%\text{Clay}) \quad \text{.....(6)}$$

กำหนดให้

W = น้ำหนักดินแห้ง (กรัม)

R_{40s} = ค่าจากไฮโดรมิเตอร์ เมื่อตั้งทิ้งไว้ที่ 40 วินาที

R_{2hr} = ค่าจากไฮโดรมิเตอร์ เมื่อตั้งทิ้งไว้ที่ 2 ชั่วโมง

ตัวอย่าง การหาปริมาณอนุภาคต่าง ๆ

การนำดินตัวอย่างที่ผึ่งแห้ง และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 เมช มาจำนวนหนึ่ง มีน้ำหนักแห้ง 50 กรัม ทำการกระจายตัวได้สารแขวนลอย 1 ลิตร อ่านค่าจากไฮโดรมิเตอร์เมื่อตั้งทิ้งไว้ 40 วินาที และ 2 ชั่วโมง ได้ 33 และ 18 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

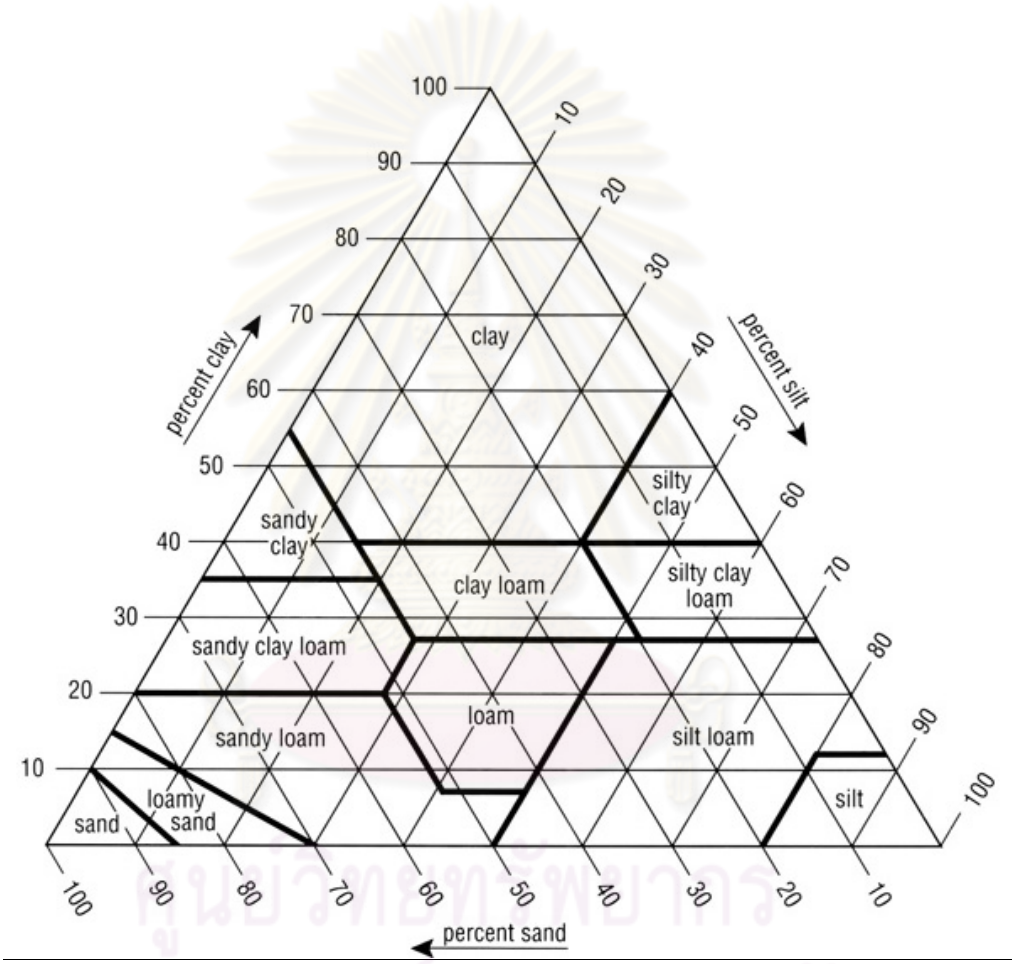
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

% Sand = [(50-13) x 100] / 50 = 34 %

% Clay = [(18_r) x 100] / 50 = 36 %

% Silt = 100-(34-36) = 30 %

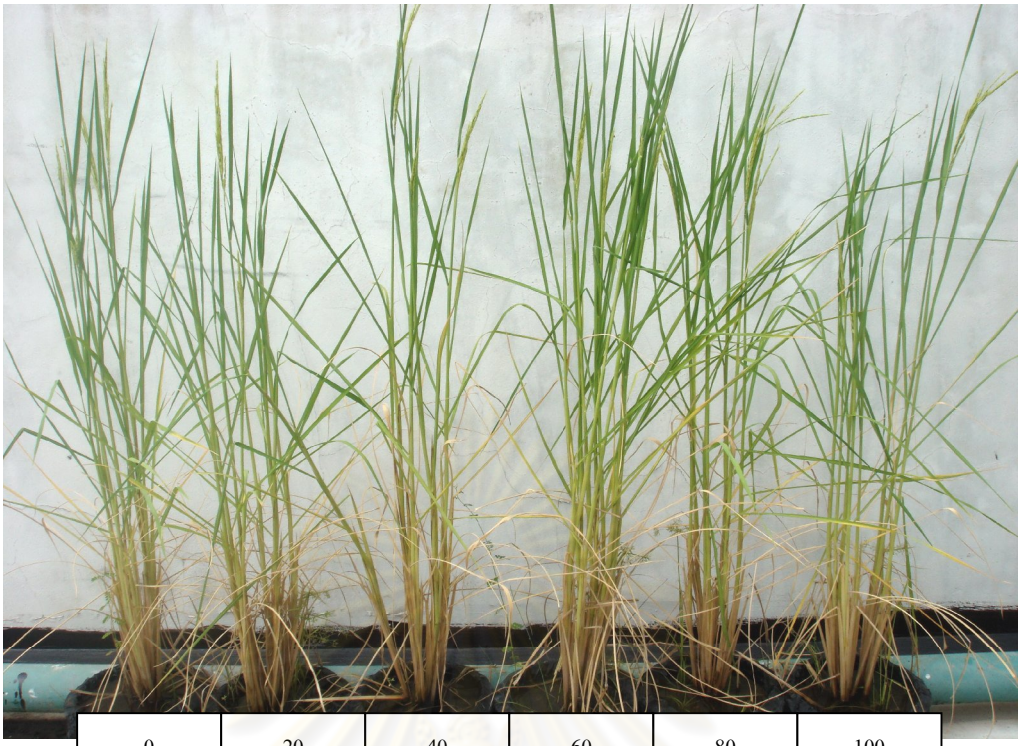
จากรูป ค-1 ทำการพลอต % ทราย เคลย์ และซิลต์ เท่ากับ 34%, 36% และ30% ตามลำดับ จากจุดตัดนี้แสดงว่ามีเนื้อสัมผัสของดินเป็น ดินเหนียวปนร่วน Clay Loam (CL)



รูปที่ ค-1 สามเหลี่ยมจำแนกเนื้อสัมผัสของดิน

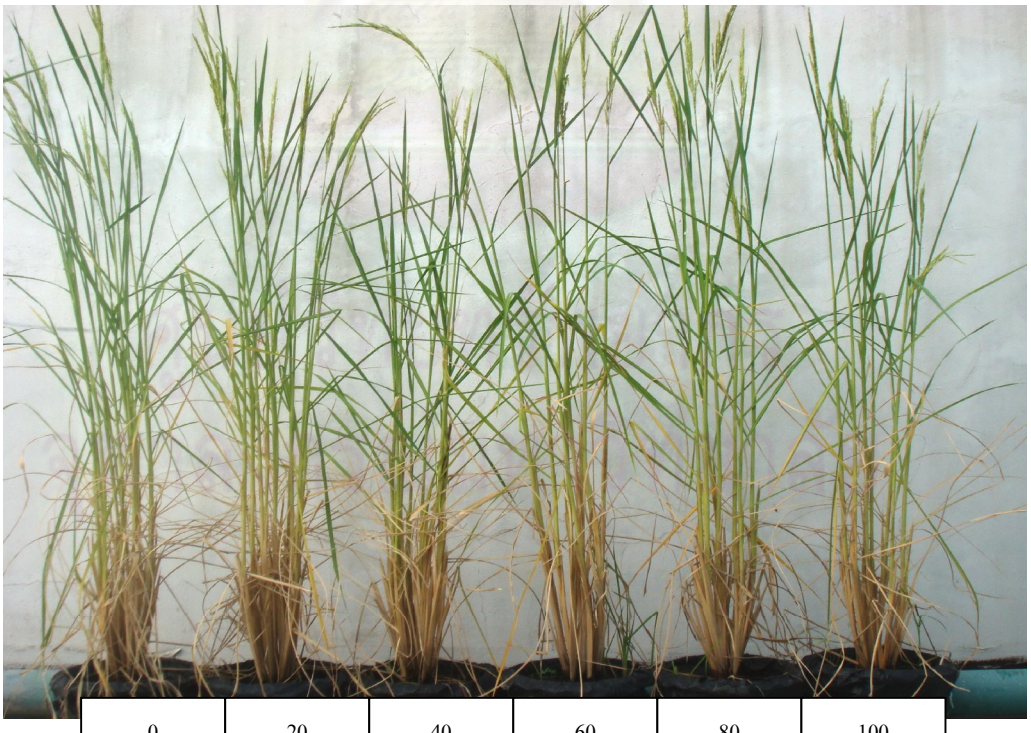
ภาคผนวก ง
รูปการทดลองปลูกข้าวสองสายพันธุ์ที่ระดับความเข้มข้นแคดเมียมต่างกัน โดยใช้ปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัม และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



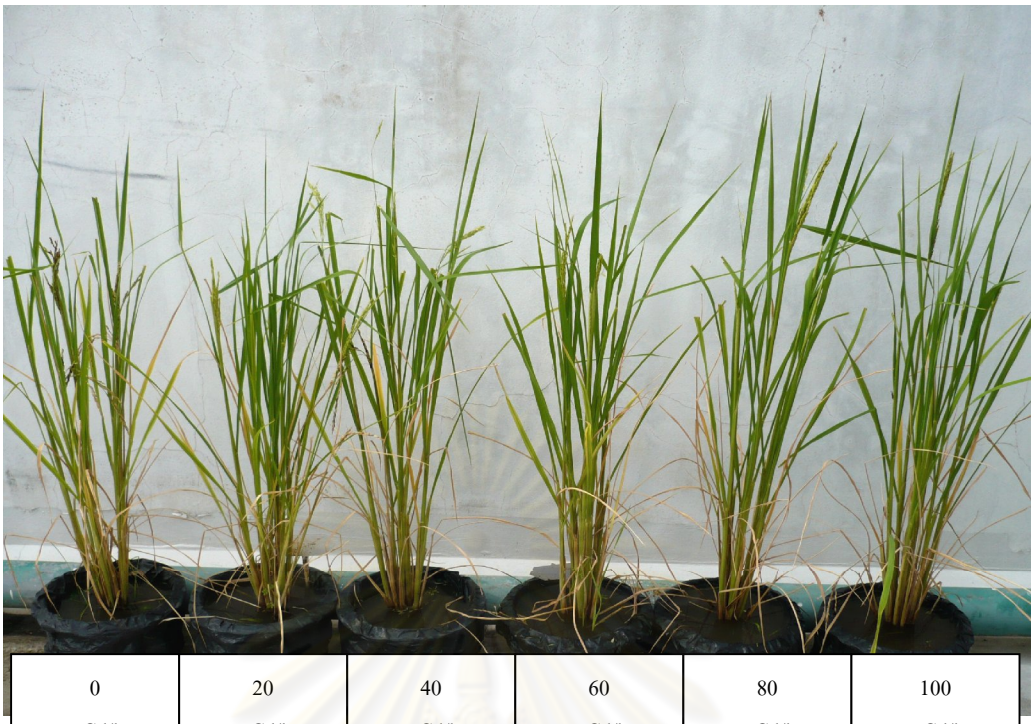
0 mgCd/kg	20 mgCd/kg	40 mgCd/kg	60 mgCd/kg	80 mgCd/kg	100 mgCd/kg

รูปที่ ง-1 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เติมผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน



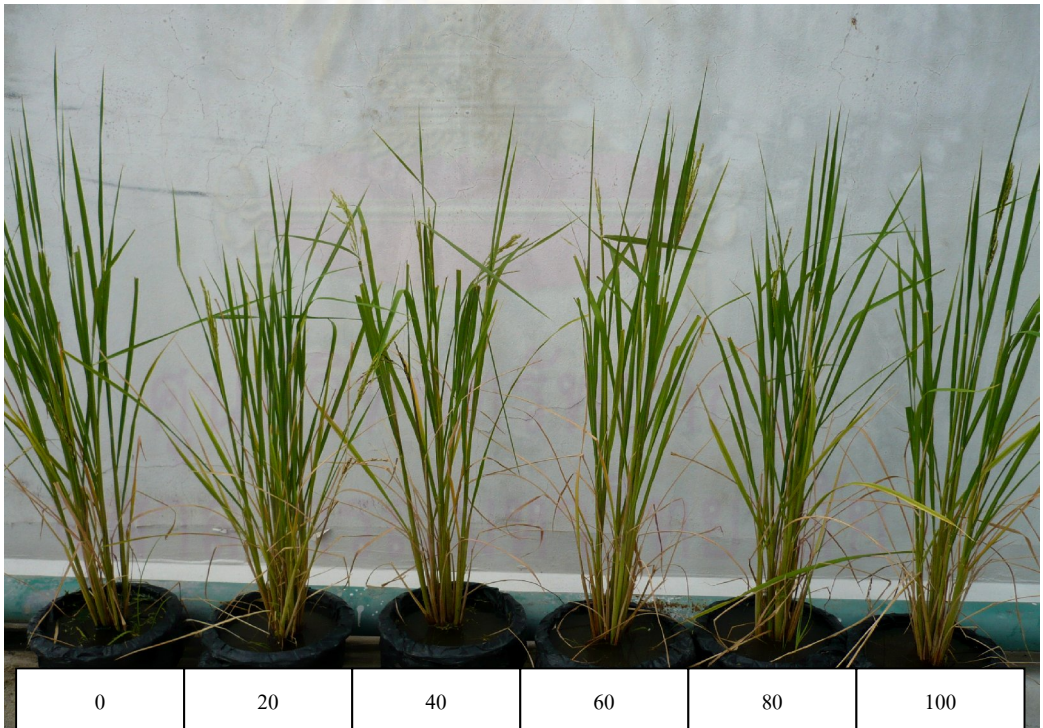
0 mgCd/kg	20 mgCd/kg	40 mgCd/kg	60 mgCd/kg	80 mgCd/kg	100 mgCd/kg

รูปที่ ง-2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เติมผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน



0 mgCd/kg	20 mgCd/kg	40 mgCd/kg	60 mgCd/kg	80 mgCd/kg	100 mgCd/kg

รูปที่ ง-3 ข้าวเหนียว กข 6 ที่เติมผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน



0 mgCd/kg	20 mgCd/kg	40 mgCd/kg	60 mgCd/kg	80 mgCd/kg	100 mgCd/kg

รูปที่ ง-4 ข้าวเหนียว กข 6 ที่เติมผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ภาคผนวก จ

ข้อมูลความสูงของข้าวสองสายพันธุ์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ และข้อมูลการวิเคราะห์ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวสองสายพันธุ์ ด้วยโปรแกรม SPSS : One-way anova ที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-1 ความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

	กระถาง					กระถาง			
24/4/2552	**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**		**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**
0/5	39.1	38.0	37.5	38.2	0/10	38.0	39.5	37.0	38.2
20/5	39.0	36.8	37.5	37.8	20/10	37.9	37.2	38.7	37.9
40/5	38.5	37.0	36.1	37.2	40/10	36.9	36.8	38.7	37.5
60/5	37.0	37.5	38.3	37.6	60/10	36.8	39.2	37.3	37.8
80/5	38.0	37.5	36.2	37.2	80/10	37.0	36.2	37.3	36.8
100/5	37.5	36.8	38.2	37.5	100/10	36.9	37.0	38.2	37.4
1/5/2552									
0/5	40.2	39.2	38.9	39.4	0/10	39.0	40.7	38.7	39.5
20/5	40.0	37.3	38.2	38.5	20/10	38.7	38.1	39.9	38.9
40/5	39.8	37.9	37.0	38.2	40/10	37.7	37.9	39.8	38.5
60/5	37.8	38.1	38.8	38.2	60/10	37.2	40.2	37.8	38.4
80/5	38.7	38.2	37.4	38.1	80/10	37.9	37.5	38.5	38.0
100/5	38.0	37.4	39.0	38.1	100/10	37.3	37.9	39.2	38.1
8/5/2552									
0/5	41.1	40.1	39.7	40.3	0/10	40.7	41.2	39.2	40.4
20/5	41.0	38.2	38.9	39.4	20/10	39.8	39.1	40.5	39.8
40/5	40.6	38.9	37.8	39.1	40/10	38.3	38.8	40.6	39.2
60/5	38.7	38.8	39.7	39.1	60/10	38.2	41.0	38.5	39.2
80/5	39.5	39.0	38.3	38.9	80/10	39.0	38.5	39.8	39.1
100/5	38.6	38.2	39.8	38.9	100/10	38.4	38.7	40.0	39.0
15/5/2552									
0/5	43.2	42.3	41.5	42.3	0/10	43.0	43.8	41.5	42.8
20/5	42.7	40.0	40.8	41.2	20/10	41.7	41.0	42.5	41.7
40/5	42.5	40.6	39.5	40.9	40/10	40.2	40.7	42.5	41.1
60/5	40.5	40.7	41.4	40.9	60/10	40.0	42.6	40.3	41.0
80/5	41.2	40.7	40.1	40.7	80/10	40.7	40.2	41.4	40.8
100/5	40.4	40.0	41.5	40.6	100/10	40.0	40.5	41.8	40.8

	กระถาง					กระถาง			
22/5/2552	**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**		**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**
0/5	47.5	46.7	45.9	46.7	0/10	47.4	48.0	46.5	47.3
20/5	46.6	44.1	45.0	45.2	20/10	45.9	45.3	46.4	45.9
40/5	46.2	44.5	43.5	44.7	40/10	44.3	44.5	46.5	45.1
60/5	44.3	44.5	45.3	44.7	60/10	43.8	46.3	44.0	44.7
80/5	45.2	44.7	44.0	44.6	80/10	44.5	44.0	45.2	44.6
100/5	44.3	43.9	45.5	44.6	100/10	43.8	44.2	45.7	44.6
29/5/2552									
0/5	52.2	50.9	50.0	51.0	0/10	51.9	52.2	50.7	51.6
20/5	50.4	48.0	48.9	49.1	20/10	50.0	49.3	50.2	49.8
40/5	50.1	48.3	47.4	48.6	40/10	48.3	48.5	50.2	49.0
60/5	48.3	48.4	49.2	48.6	60/10	47.7	50.0	48.5	48.7
80/5	49.1	48.5	47.8	48.5	80/10	48.3	48.2	49.0	48.5
100/5	48.2	47.9	48.2	48.1	100/10	47.5	48.0	49.5	48.3
5/6/2552									
0/5	58.0	56.9	56.7	57.2	0/10	58.2	58.5	57.4	58.0
20/5	56.2	55.8	55.8	55.9	20/10	57.0	57.0	57.2	57.1
40/5	56.0	54.5	53.7	54.7	40/10	54.5	54.7	56.9	55.4
60/5	54.2	54.4	55.6	54.7	60/10	53.8	56.8	54.5	55.0
80/5	55.3	54.6	53.5	54.5	80/10	55.0	54.5	55.2	54.9
100/5	54.9	53.9	54.8	54.5	100/10	54.7	53.9	56.0	54.9
12/6/2552									
0/5	61.2	60.0	59.7	60.3	0/10	61.3	61.6	60.5	61.1
20/5	59.5	58.7	58.9	59.0	20/10	60.2	59.5	60.4	60.0
40/5	59.5	58.0	57.2	58.2	40/10	57.7	58.1	60.2	58.7
60/5	57.5	57.8	59.0	58.1	60/10	57.2	60.0	57.8	58.3
80/5	58.6	58.2	56.9	57.9	80/10	58.2	57.6	59.0	58.3
100/5	58.0	57.4	57.9	57.8	100/10	58.2	56.9	59.3	58.1

	กระถาง					กระถาง			
19/6/2552	**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**		**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**
0/5	65.8	65.4	65.2	65.5	0/10	66.8	67.0	66.2	66.7
20/5	64.6	62.5	64.3	63.8	20/10	65.3	64.6	65.5	65.1
40/5	64.7	63.0	63.0	63.6	40/10	63.1	63.5	65.4	64.0
60/5	62.5	62.9	63.2	62.9	60/10	62.1	65.3	63.0	63.5
80/5	63.4	63.1	62.0	62.8	80/10	63.3	62.5	64.1	63.3
100/5	63.2	62.3	61.7	62.4	100/10	63.4	62.0	64.2	63.2
26/6/2552									
0/5	71.9	71.5	71.4	71.6	0/10	72.0	73.2	72.5	72.6
20/5	70.7	68.5	70.5	69.9	20/10	71.4	70.8	71.5	71.2
40/5	70.5	69.1	68.9	69.5	40/10	69.5	69.5	71.3	70.1
60/5	68.3	68.9	69.1	68.8	60/10	68.0	71.4	69.1	69.5
80/5	69.5	69.0	67.9	68.8	80/10	69.2	68.3	70.1	69.2
100/5	69.3	68.5	67.8	68.5	100/10	69.5	67.9	70.2	69.2
3/7/2552									
0/5	76.2	75.6	75.9	75.9	0/10	76.9	77.5	76.6	77.0
20/5	75.2	72.8	74.5	74.2	20/10	75.9	75.1	76.0	75.7
40/5	74.7	73.6	72.9	73.7	40/10	73.6	74.6	75.8	74.7
60/5	72.8	73.1	73.4	73.1	60/10	72.2	75.5	73.7	73.8
80/5	73.7	72.9	71.2	72.6	80/10	73.3	72.4	74.5	73.4
100/5	73.4	72.5	71.9	72.6	100/10	73.4	71.9	74.6	73.3
10/7/2552									
0/5	80.5	79.8	80.2	80.2	0/10	81.5	82.0	80.9	81.5
20/5	79.5	77.4	78.9	78.6	20/10	80.5	79.8	79.5	79.9
40/5	78.9	78	77.2	78.0	40/10	77.9	78.8	80.0	78.9
60/5	77.0	77.5	77.8	77.4	60/10	76.6	78.7	77.9	77.7
80/5	77.8	77.3	75.6	76.9	80/10	77.8	76.5	78.7	77.7
100/5	77.5	76.9	76.2	76.9	100/10	77.5	76.3	78.9	77.6

	กระถาง					กระถาง			
17/7/2552	**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**		**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**
0/5	84.4	83.0	84.2	83.9	0/10	85.0	86.1	85.0	85.4
20/5	84.5	82.0	83.0	83.2	20/10	84.7	83.5	83.6	83.9
40/5	82.0	81.5	79.4	81.0	40/10	82.0	82.5	83.9	82.8
60/5	80.8	81.5	83.0	81.8	60/10	81.0	82.0	82.4	81.8
80/5	81.0	81.5	79.5	80.7	80/10	82.2	80.3	82.5	81.7
100/5	81.0	80.7	80.4	80.7	100/10	81.5	80.0	83.1	81.5
24/7/2552									
0/5	88.5	87.0	88.8	88.1	0/10	89.0	90.2	89.2	89.5
20/5	89.9	85.8	87.2	87.6	20/10	88.5	87.8	87.9	88.1
40/5	86.2	86.0	81.8	84.7	40/10	86.0	86.7	87.5	86.7
60/5	84.2	86.1	86.6	85.6	60/10	85.5	86.1	86.2	85.9
80/5	85.0	86.0	83.2	84.7	80/10	86.4	84.5	86.7	85.9
100/5	84.8	84.8	84.2	84.6	100/10	85.5	83.9	88.0	85.8
31/7/2552									
0/5	93.0	91.2	93.4	92.5	0/10	93.4	94.1	93.8	93.8
20/5	93.8	90.0	91.5	91.8	20/10	92.2	92.0	92.1	92.1
40/5	90.5	90.1	89.9	90.2	40/10	90.0	90.8	91.8	90.9
60/5	88.2	90.4	91.0	89.9	60/10	89.7	90.0	90.5	90.1
80/5	88.8	90.0	87.5	88.8	80/10	90.5	89.0	90.8	90.1
100/5	89.0	89.0	88.7	88.9	100/10	89.7	88.0	92.0	89.9
7/8/2552									
0/5	96.2	94.5	95.2	95.3	0/10	97.0	97.2	97.0	97.1
20/5	97.0	93.1	94.5	94.9	20/10	95.5	94.5	95.0	95.0
40/5	93.5	93.2	93.0	93.2	40/10	93.4	93.0	95.0	93.8
60/5	91.1	93.5	94.0	92.9	60/10	92.9	92.7	94.0	93.2
80/5	92.0	93.0	90.5	91.8	80/10	94.0	92.0	93.5	93.2
100/5	91.8	92.2	91.4	91.8	100/10	91.6	91.7	95.2	92.8

	กระถาง					กระถาง			
14/8/2552	**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**		**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**
0/5	100.0	98.5	99.4	99.3	0/10	100.5	101.0	101.2	100.9
20/5	100.1	96.5	97.6	98.1	20/10	98.8	98.0	98.1	98.3
40/5	96.8	96.2	96.1	96.4	40/10	96.5	96.0	98.2	96.9
60/5	94.4	96.8	97.2	96.1	60/10	96.5	95.8	96.7	96.3
80/5	95.2	96.0	93.8	95.0	80/10	96.8	95.5	96.5	96.3
100/5	95.0	95.1	94.5	94.9	100/10	94.9	94.5	98.4	95.9
21/8/2552									
0/5	103.8	102.0	102.5	102.8	0/10	104.0	105.2	104.5	104.6
20/5	103.0	100.0	100.7	101.2	20/10	102.0	102.3	101.4	101.9
40/5	100.0	99.3	99.2	99.5	40/10	99.9	99.2	101.5	100.2
60/5	97.9	99.7	100.5	99.4	60/10	99.8	99.0	99.8	99.5
80/5	98.5	99.0	96.9	98.1	80/10	101.1	98.7	99.7	99.8
100/5	98.2	98.4	97.6	98.1	100/10	98.0	97.8	101.5	99.1
28/8/2552									
0/5	106.8	105.2	105.6	105.9	0/10	107.8	108.5	107.7	108.0
20/5	106.5	103.4	103.5	104.5	20/10	105.8	106.0	105.0	105.6
40/5	103.5	102.5	102.0	102.7	40/10	103.0	102.4	104.8	103.4
60/5	101.0	102.9	103.4	102.4	60/10	102.8	102.5	103.0	102.8
80/5	102.0	102.1	100.0	101.4	80/10	103.5	101.9	102.7	102.7
100/5	101.5	101.6	100.5	101.2	100/10	101.2	100.9	105.7	102.6
4/9/2552									
0/5	109.0	107.5	107.8	108.1	0/10	109.8	110.7	109.5	110.0
20/5	108.5	105.5	105.5	106.5	20/10	107.9	108.0	107.9	107.9
40/5	105.6	105.0	104.2	104.9	40/10	105.0	104.5	107.0	105.5
60/5	103.2	105.5	105.5	104.7	60/10	104.5	104.5	105.3	104.8
80/5	104.0	102.1	102.5	102.9	80/10	105.5	104.0	104.8	104.8
100/5	103.4	102.6	102.5	102.8	100/10	103.0	103.0	107.9	104.6

	กระถาง					กระถาง			
11/9/2552	**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**		**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**
0/5	109.7	108.5	109.2	109.1	0/10	111.0	112.1	110.0	111.0
20/5	110.6	107.9	107.8	108.8	20/10	110.0	109.8	109.9	109.9
40/5	107.8	107.2	107.4	107.5	40/10	108.2	108.0	109.6	108.6
60/5	106.5	107.8	107.6	107.3	60/10	107.0	107.2	108.0	107.4
80/5	106.9	105.5	106.0	106.1	80/10	108.2	105.8	107.9	107.3
100/5	106.0	105.5	105.7	105.7	100/10	106.0	105.8	110.0	107.3
18/9/2552									
0/5	110.0	109.5	110.2	109.9	0/10	111.5	112.5	110.4	111.5
20/5	110.8	108.4	109.0	109.4	20/10	110.2	110.1	110.2	110.2
40/5	108.5	108.0	108.0	108.2	40/10	108.6	108.5	109.8	109.0
60/5	107.1	108.3	108.7	108.0	60/10	107.8	108.7	108.9	108.5
80/5	107.8	106.5	107.0	107.1	80/10	108.8	106.5	108.2	107.8
100/5	107.8	106.4	106.9	107.0	100/10	106.2	106.2	110.4	107.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-2 ความสูงของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

	กระถาง					กระถาง			
24/4/2552	**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**		**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**
0/5	37.0	36.8	36.5	36.8	0/10	36.2	37.5	38.0	37.2
20/5	36.2	38.1	36.9	37.1	20/10	37.7	38.0	38.1	37.9
40/5	37.8	36.5	37.0	37.1	40/10	36.0	36.5	38.9	37.1
60/5	38.0	36.0	36.9	37.0	60/10	37.0	38.1	37.7	37.6
80/5	37.0	35.8	36.2	36.3	80/10	36.8	37.3	38.0	37.4
100/5	35.4	36.8	35.7	36.0	100/10	37.0	36.0	35.8	36.3
1/5/2552									
0/5	38.1	37.9	37.2	37.7	0/10	37.3	38.8	39.0	38.4
20/5	37.1	38.6	37.3	37.7	20/10	38.1	38.5	38.6	38.4
40/5	38.3	37.1	37.5	37.6	40/10	37.2	37.4	39.9	38.2
60/5	38.5	36.6	37.5	37.5	60/10	38.0	38.8	38.0	38.3
80/5	37.4	36.5	37.0	37.0	80/10	37.5	38.1	38.3	38.0
100/5	36.2	37.1	36.2	36.5	100/10	37.8	36.8	36.5	37.0
8/5/2552									
0/5	41.5	40.8	40.0	40.8	0/10	40.8	41.5	41.9	41.4
20/5	39.8	41.5	40.2	40.5	20/10	40.9	41.2	41.5	41.2
40/5	41.5	39.7	40.2	40.5	40/10	40.0	40.2	42.8	41.0
60/5	41.7	39.2	40.3	40.4	60/10	40.7	41.6	40.9	41.1
80/5	40.0	39.0	39.7	39.6	80/10	40.2	41.0	41.1	40.8
100/5	38.8	39.8	39.1	39.2	100/10	40.5	39.4	39.3	39.7
15/5/2552									
0/5	45.9	45.0	44.1	45.0	0/10	45.1	45.2	45.5	45.3
20/5	43.3	45.2	44.1	44.2	20/10	44.7	45.0	45.2	45.0
40/5	45.2	43.1	44.0	44.1	40/10	43.8	44.1	46.4	44.8
60/5	45.4	43.0	43.9	44.1	60/10	44.5	45.4	44.3	44.7
80/5	43.9	42.9	43.5	43.4	80/10	44.0	44.9	44.6	44.5
100/5	42.0	43.1	42.5	42.5	100/10	44.2	43.0	43.1	43.4

	กระถาง					กระถาง			
22/5/2552	**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**		**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**
0/5	52.0	51.2	50.4	51.2	0/10	51.8	51.9	52.0	51.9
20/5	49.2	51.0	50.1	50.1	20/10	50.5	50.8	51.0	50.8
40/5	51.0	48.9	50.0	50.0	40/10	49.6	49.8	52.1	50.5
60/5	51.3	48.5	49.8	49.9	60/10	50.3	51.0	50.1	50.5
80/5	49.7	48.7	49.2	49.2	80/10	50.0	50.5	50.3	50.3
100/5	47.5	48.7	47.8	48.0	100/10	50.0	48.9	50.0	49.6
29/5/2552									
0/5	60.2	59.0	58.5	59.2	0/10	60.0	60.2	60.5	60.2
20/5	57.1	58.8	58.0	58.0	20/10	58.4	58.8	58.9	58.7
40/5	58.8	56.8	57.5	57.7	40/10	57.3	57.6	60.1	58.3
60/5	58.9	56.5	57.7	57.7	60/10	58.1	58.8	58.0	58.3
80/5	57.5	56.5	57.0	57.0	80/10	57.8	58.3	58.2	58.1
100/5	55.2	56.0	55.3	55.5	100/10	57.5	57.5	57.3	57.4
5/6/2552									
0/5	70.5	69	68.7	69.4	0/10	70.8	70.0	70.5	70.4
20/5	67.2	68.9	69.3	68.5	20/10	68.5	68.9	69.3	68.9
40/5	69.7	66.8	67.7	68.1	40/10	67.3	67.6	70.0	68.3
60/5	70.0	66.3	67.8	68.0	60/10	68.1	69.0	67.7	68.3
80/5	68.0	66.8	66.9	67.2	80/10	67.6	68.2	68.0	67.9
100/5	65.0	65.7	65.0	65.2	100/10	67.1	67.2	67.0	67.1
12/6/2552									
0/5	75.8	74.2	74.0	74.7	0/10	76.2	75.1	75.8	75.7
20/5	72.4	73.1	74.5	73.3	20/10	74.0	74.3	74.5	74.3
40/5	74.7	72.2	72.8	73.2	40/10	72.5	72.8	75.1	73.5
60/5	75.1	71.2	73.2	73.2	60/10	72.1	74.3	73.5	73.3
80/5	73.4	72.1	71.9	72.5	80/10	72.8	73.5	73.2	73.2
100/5	70.1	70.8	70.0	70.3	100/10	72.2	71.8	71.6	71.9

	กระถาง					กระถาง			
19/6/2552	**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**		**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**
0/5	82.0	80.5	80.2	80.9	0/10	82.3	81.5	81.9	81.9
20/5	78.7	79.2	80.8	79.6	20/10	80.2	80.5	80.6	80.4
40/5	80.8	78.5	79.0	79.4	40/10	78.5	79.1	81.2	79.6
60/5	81.3	77.3	79.3	79.3	60/10	78.2	80.4	79.6	79.4
80/5	79.7	78.1	78.1	78.6	80/10	79.0	79.6	79.2	79.3
100/5	75.8	79.0	75.8	76.9	100/10	77.9	77.6	77.8	77.8
26/6/2552									
0/5	87.5	85.8	85.9	86.4	0/10	87.5	87.2	87.9	87.5
20/5	83.8	84.5	86.6	85.0	20/10	86.0	85.8	86.4	86.1
40/5	85.9	83.4	84.3	84.5	40/10	83.7	84.3	86.5	84.8
60/5	86.4	82.3	84.5	84.4	60/10	83.5	85.5	84.8	84.6
80/5	84.0	83.5	83.4	83.6	80/10	83.9	84.9	84.5	84.4
100/5	81.0	83.5	80.2	81.6	100/10	83.0	82.5	82.8	82.8
3/7/2552									
0/5	90.0	89.5	89.2	89.6	0/10	91.5	90.2	91.2	91.0
20/5	87.2	87.9	88.1	87.7	20/10	88.8	89.3	90.0	89.4
40/5	88.0	87.0	87.5	87.5	40/10	86.8	88.0	89.8	88.2
60/5	88.5	86.1	87.8	87.5	60/10	86.8	89.0	87.9	87.9
80/5	88.0	87.0	86.5	87.2	80/10	87.0	88.2	88.0	87.7
100/5	84.7	86.5	83.9	85.0	100/10	86.0	85.6	86.0	85.9
10/7/2552									
0/5	94.1	92.7	92.5	93.1	0/10	94.5	94.2	95.0	94.6
20/5	90.0	91.2	93.5	91.6	20/10	92.0	92.8	93.7	92.8
40/5	92.0	90.0	90.8	90.9	40/10	89.8	91.0	93.0	91.3
60/5	91.2	89.2	91.0	90.5	60/10	90.4	91.9	90.0	90.8
80/5	91.1	90.2	89.5	90.3	80/10	90.3	90.9	91.0	90.7
100/5	88.5	90.0	89.0	89.2	100/10	89.5	89.0	90.0	89.5

	กระถาง					กระถาง			
17/7/2552	**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**		**1**	**2**	**3**	**เฉลี่ย**
0/5	96.6	95.4	95.0	95.7	0/10	98.5	97.5	97.2	97.7
20/5	93.0	94.2	96.7	94.6	20/10	95.1	96.0	97.0	96.0
40/5	95.2	93.0	93.8	94.0	40/10	93.5	94.4	97.5	95.1
60/5	94.2	92.5	94.1	93.6	60/10	94.0	95.0	93.2	94.1
80/5	94.3	93.2	93.0	93.5	80/10	93.5	94.5	94.0	94.0
100/5	91.9	93.5	92.5	92.6	100/10	93.0	92.8	94.0	93.3
24/7/2552									
0/5	96.7	95.6	95.4	95.9	0/10	98.9	97.7	97.8	98.1
20/5	93.2	94.5	97.0	94.9	20/10	95.4	96.4	97.2	96.3
40/5	95.8	93.4	94.2	94.5	40/10	93.6	94.7	97.7	95.3
60/5	94.5	92.8	94.5	93.9	60/10	94.4	95.3	93.5	94.4
80/5	94.6	93.5	93.4	93.8	80/10	93.7	95.0	94.3	94.3
100/5	92.7	93.7	93.0	93.1	100/10	93.7	93.5	94.7	94.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-3 ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

ความสูง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	33.958	5	6.792	8.032	.002
Within Groups	10.147	12	.846		
Total	44.105	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

ความสูง

Duncan [a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01	
		1	2
100.00	3	107.0333	
80.00	3	107.1000	
60.00	3	108.0333	
40.00	3	108.1667	
20.00	3	109.4000	109.4000
.00	3		110.9667
Sig.		.014	.059

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ จ-4 ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

ความสูง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	33.032	5	6.606	4.273	.018
Within Groups	18.553	12	1.546		
Total	51.585	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

ความสูง

Duncan [a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01	
		1	2
100.00	3	107.6000	
80.00	3	107.8333	
60.00	3	108.4667	108.4667
40.00	3	108.9667	108.9667
20.00	3	110.1667	110.1667
.00	3		111.4667
Sig.		.039	.017

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ จ-5 ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

ความสูง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	13.916	5	2.783	2.262	.115
Within Groups	14.767	12	1.231		
Total	28.683	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

ความสูง

Duncan [a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01
		1
100	3	93.1333
80	3	93.8333
60	3	93.9333
40	3	94.4667
20	3	94.9000
0	3	95.9000
Sig.		.017

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ จ-6 ผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

ความสูง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	37.612	5	7.522	6.094	.005
Within Groups	14.813	12	1.234		
Total	52.425	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

ความสูง

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01	
		1	2
100	3	93.9667	
80	3	94.3333	
60	3	94.4000	
40	3	95.3333	95.3333
20	3	96.3333	96.3333
0	3		98.1333
Sig.		.034	.012

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ จ-7 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ผงกระดูกหมู	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ความสูง	5กรัม	18	108.4500	1.61072	.37965
	10กรัม	18	109.0833	1.74196	.41058

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
ความสูง	Equal variances assumed	.300	.587	-1.133	34	.265	-.6333	.55921	-2.15907	.89240
	Equal variances not assumed			-1.133	33.794	.265	-.6333	.55921	-2.15962	.89295

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

138

ตารางที่ จ-8 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ผงกระดูกหมู	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ความสูง	5 กรัม	18	94.3611	1.29893	.30616
	10 กรัม	18	95.4167	1.75608	.41391

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
ความสูง	Equal variances assumed	2.439	.128	-2.050	34	.048	-1.0556	.51484	-2.46024	.34913
	Equal variances not assumed			-2.050	31.317	.049	-1.0556	.51484	-2.46737	.35625

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

139

ตารางที่ จ-9 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ชนิดข้าว	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ความสูง	ขาวดอกมะลิ 105	18	108.4500	1.61072	.37965
	เหนียวกข 6	18	94.3611	1.29893	.30616

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
ความสูง	Equal variances assumed	.268	.608	28.887	34	.000	14.0889	.48772	12.75820	15.41958
	Equal variances not assumed			28.887	32.539	.000	14.0889	.48772	12.75467	15.42311

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

140

ตารางที่ จ-10 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อความสูงของข้าวสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ชนิดข้าว	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
ความสูง	ข้าวขาวดอกมะลิ 105	18	109.0833	1.74196	.41058
	ข้าวเหนียวกข 6	18	95.4167	1.75608	.41391

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
ความสูง	Equal variances assumed	.072	.790	23.442	34	.000	13.6667	.58301	12.07598	15.25735
	Equal variances not assumed			23.442	33.998	.000	13.6667	.58301	12.07598	15.25736

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

141

ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลผลผลิต (เมล็ด) ข้าวสองสายพันธุ์ และข้อมูลการวิเคราะห์ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวสองสายพันธุ์ ด้วยโปรแกรม SPSS : One-way anova ที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ-1 ผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ค่าเฉลี่ย
0/5-1	70.10	70.24
0/5-2	69.65	
0/5-3	70.98	
20/5-1	68.74	68.22
20/5-2	68.33	
20/5-3	67.59	
40/5-1	62.06	64.35
40/5-2	66.67	
40/5-3	64.32	
60/5-1	59.86	60.01
60/5-2	59.98	
60/5-3	60.20	
80/5-1	58.25	58.08
80/5-2	58.11	
80/5-3	57.89	
100/5-1	56.45	55.81
100/5-2	57.21	
100/5-3	53.77	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ-2 ผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ค่าเฉลี่ย
0/10-1	74.02	75.54
0/10-2	76.86	
0/10-3	75.74	
20/10-1	72.33	72.57
20/10-2	72.69	
20/10-3	72.70	
40/10-1	67.50	68.25
40/10-2	68.46	
40/10-3	68.78	
60/10-1	61.11	62.37
60/10-2	60.58	
60/10-3	65.42	
80/10-1	61.01	60.29
80/10-2	59.67	
80/10-3	60.19	
100/10-1	57.75	57.70
100/10-2	59.95	
100/10-3	55.40	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ-3 ผลผลิตของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ค่าเฉลี่ย
0/5-1	57.65	57.40
0/5-2	57.94	
0/5-3	56.60	
20/5-1	55.65	54.57
20/5-2	53.72	
20/5-3	54.34	
40/5-1	52.90	52.72
40/5-2	52.87	
40/5-3	52.39	
60/5-1	50.06	51.17
60/5-2	51.23	
60/5-3	52.22	
80/5-1	47.55	48.51
80/5-2	48.43	
80/5-3	49.54	
100/5-1	44.64	46.92
100/5-2	45.86	
100/5-3	50.26	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ-4 ผลผลิตของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กรัม)	ค่าเฉลี่ย
0/10-1	60.31	61.26
0/10-2	60.65	
0/10-3	62.82	
20/10-1	59.65	57.73
20/10-2	56.76	
20/10-3	56.78	
40/10-1	55.28	55.29
40/10-2	55.24	
40/10-3	55.36	
60/10-1	53.76	53.57
60/10-2	51.34	
60/10-3	55.61	
80/10-1	50.57	50.28
80/10-2	49.28	
80/10-3	51.00	
100/10-1	49.09	48.14
100/10-2	49.14	
100/10-3	46.18	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ-5 ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

น้ำหนักเมล็ดข้าว

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	498.161	5	99.632	63.330	.000
Within Groups	18.879	12	1.573		
Total	517.039	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

น้ำหนักเมล็ดข้าว

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01			
		1	2	3	4
100	3	55.8100			
80	3	58.0833	58.0833		
60	3		60.0133		
40	3			64.3500	
20	3				68.2200
0	3				70.2433
Sig.		.046	.084	1.000	.072

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ฉ-6 ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

น้ำหนักเมล็ดข้าว

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	761.557	5	152.311	60.061	.000
Within Groups	30.431	12	2.536		
Total	791.988	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

น้ำหนักเมล็ดข้าว

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01			
		1	2	3	4
100	3	57.7000			
80	3	60.2900	60.2900		
60	3		62.3700		
40	3			68.2467	
20	3				72.5733
0	3				75.5400
Sig.		.070	.136	1.000	.042

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ฉ-7 ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

น้ำหนักเมล็ดข้าว

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	224.581	5	44.916	21.643	.000
Within Groups	24.904	12	2.075		
Total	249.485	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

น้ำหนักเมล็ดข้าว

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01			
		1	2	3	4
100	3	46.9200			
80	3	48.5067	48.5067		
60	3		51.1700	51.1700	
40	3			52.7200	
20	3			54.5700	54.5700
0	3				57.3967
Sig.		.202	.043	.017	.033

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ฉ-8 ผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

น้ำหนักเมล็ดข้าว

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	347.427	5	69.485	32.366	.000
Within Groups	25.763	12	2.147		
Total	373.190	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

น้ำหนักเมล็ดข้าว

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01				
		1	2	3	4	5
100	3	48.1367				
80	3	50.2833	50.2833			
60	3		53.5700	53.5700		
40	3			55.2933	55.2933	
20	3				57.7300	57.7300
0	3					61.2600
Sig.		.098	.018	.175	.064	.012

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ฉ-9 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ผงกระดูกหมู	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
น้ำหนักเมล็ดข้าว	5 กรัม	18	62.7867	5.51490	1.29987
	10 กรัม	18	66.1200	6.82551	1.60879

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
น้ำหนักเมล็ดข้าว	Equal variances assumed	1.620	.212	-1.612	34	.116	-3.33333	2.06830	-8.97647	2.30981
	Equal variances not assumed			-1.612	32.563	.117	-3.33333	2.06830	-8.99119	2.32452

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

151

ตารางที่ ฉ-10 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ผงกระดูกหมู	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
น้ำหนักเมล็ดข้าว	5 กรัม	18	51.8806	3.83088	.90295
	10 กรัม	18	54.3789	4.68533	1.10434

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
น้ำหนักเมล็ดข้าว	Equal variances assumed	1.042	.315	-1.751	34	.089	-2.49833	1.42649	-6.39037	1.39371
	Equal variances not assumed			-1.751	32.709	.089	-2.49833	1.42649	-6.39945	1.40278

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

152

ตารางที่ ฉ-11 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ชนิดข้าว	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
น้ำหนักเมล็ดข้าว	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	62.7867	5.51490	1.29987
	ข้าวเหนียวกข 6	18	51.8806	3.83088	.90295

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
น้ำหนักเมล็ดข้าว	Equal variances assumed	6.248	.017	6.891	34	.000	10.90611	1.58271	6.58784	15.22438
	Equal variances not assumed			6.891	30.308	.000	10.90611	1.58271	6.55662	15.25560

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

153

ตารางที่ ฉ-12 เปรียบเทียบความแตกต่างผลของแคดเมียมต่อผลผลิตของข้าวสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ชนิดข้าว	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
น้ำหนักเมล็ดข้าว	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	66.1200	6.82551	1.60879
	ข้าวเหนียว กข 6	18	54.3789	4.68533	1.10434

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
น้ำหนักเมล็ดข้าว	Equal variances assumed	5.645	.023	6.017	34	.000	11.74111	1.95135	6.41706	17.06517
	Equal variances not assumed			6.017	30.110	.000	11.74111	1.95135	6.37622	17.10600

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

154

ภาคผนวก ช

ข้อมูลปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของข้าวสองสายพันธุ์ และข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS : One-way anova ที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ช-1 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ข้าวขาวดอกมะลิ 105	ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg/kg)				
ตัวอย่าง	เมล็ด	เปลือก	ต้น	ใบ	ราก
0/5-1	ND	ND	ND	ND	ND
0/5-2	ND	ND	ND	ND	ND
0/5-3	ND	ND	ND	ND	ND
20/5-1	ND	ND	1.47	ND	2.06
20/5-2	ND	ND	1.48	ND	2.01
20/5-3	ND	ND	1.54	ND	2.09
40/5-1	ND	ND	2.11	ND	5.85
40/5-2	ND	ND	2.27	ND	5.86
40/5-3	ND	ND	2.27	ND	5.99
60/5-1	ND	ND	2.51	ND	10.84
60/5-2	ND	ND	2.65	ND	10.86
60/5-3	ND	ND	2.47	ND	10.98
80/5-1	ND	ND	6.46	0.57	15.77
80/5-2	ND	ND	6.61	0.52	15.78
80/5-3	ND	ND	6.49	0.44	15.95
100/5-1	ND	ND	7.15	0.60	27.06
100/5-2	ND	ND	7.32	0.67	27.04
100/5-3	ND	ND	7.50	0.74	27.37

ตารางที่ ช-2 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ข้าวขาวดอกมะลิ 105	ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg/kg)				
ตัวอย่าง	เมล็ด	เปลือก	ต้น	ใบ	ราก
0/10-1	ND	ND	ND	ND	ND
0/10-2	ND	ND	ND	ND	ND
0/10-3	ND	ND	ND	ND	ND
20/10-1	ND	ND	0.97	ND	1.25
20/10-2	ND	ND	1.04	ND	1.21
20/10-3	ND	ND	1.21	ND	1.30
40/10-1	ND	ND	1.87	ND	3.74
40/10-2	ND	ND	1.86	ND	4.02
40/10-3	ND	ND	2.03	ND	3.88
60/10-1	ND	ND	3.82	ND	6.87
60/10-2	ND	ND	3.96	ND	6.54
60/10-3	ND	ND	3.74	ND	6.42
80/10-1	ND	ND	5.38	0.39	10.62
80/10-2	ND	ND	5.48	0.42	11.08
80/10-3	ND	ND	5.49	0.49	11.13
100/10-1	ND	ND	6.78	0.50	21.49
100/10-2	ND	ND	6.53	0.55	21.32
100/10-3	ND	ND	6.69	0.48	21.09

ตารางที่ ช-3 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ข้าวเหนียว กข 6	ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg/kg)				
ตัวอย่าง	เมล็ด	เปลือก	ต้น	ใบ	ราก
0/5-1	ND	ND	ND	ND	ND
0/5-2	ND	ND	ND	ND	ND
0/5-3	ND	ND	ND	ND	ND
20/5-1	ND	ND	3.27	ND	4.11
20/5-2	ND	ND	3.06	ND	4.17
20/5-3	ND	ND	3.35	ND	4.09
40/5-1	ND	ND	4.33	0.47	14.26
40/5-2	ND	ND	4.28	0.41	14.25
40/5-3	ND	ND	4.17	0.43	14.32
60/5-1	ND	ND	5.61	0.79	25.34
60/5-2	ND	ND	5.59	0.79	25.57
60/5-3	ND	ND	5.75	0.76	25.52
80/5-1	ND	ND	9.22	0.83	38.06
80/5-2	ND	ND	9.27	0.80	38.01
80/5-3	ND	ND	9.25	0.80	37.95
100/5-1	ND	ND	14.68	1.41	55.56
100/5-2	ND	ND	14.65	1.44	55.58
100/5-3	ND	ND	14.37	1.36	55.39

ตารางที่ ช-4 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ข้าวเหนียว กข 6	ความเข้มข้นของแคดเมียม (mg/kg)				
ตัวอย่าง	เมล็ด	เปลือก	ต้น	ใบ	ราก
0/10-1	ND	ND	ND	ND	ND
0/10-2	ND	ND	ND	ND	ND
0/10-3	ND	ND	ND	ND	ND
20/10-1	ND	ND	2.21	ND	3.22
20/10-2	ND	ND	2.24	ND	3.18
20/10-3	ND	ND	2.28	ND	3.25
40/10-1	ND	ND	3.03	0.36	8.37
40/10-2	ND	ND	3.07	0.40	8.32
40/10-3	ND	ND	3.11	0.36	8.31
60/10-1	ND	ND	5.04	0.64	20.49
60/10-2	ND	ND	5.01	0.61	20.30
60/10-3	ND	ND	4.78	0.58	19.96
80/10-1	ND	ND	5.79	0.67	32.47
80/10-2	ND	ND	5.86	0.77	32.98
80/10-3	ND	ND	5.74	0.74	32.94
100/10-1	ND	ND	7.01	1.33	48.69
100/10-2	ND	ND	7.00	1.33	48.74
100/10-3	ND	ND	7.04	1.18	48.55

ตารางที่ ช-5 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
เมล็ด	Between Groups	.000	5	.000	.	.
	Within Groups	.000	12	.000		
	Total	.000	17			
เปลือก	Between Groups	.000	5	.000	.	.
	Within Groups	.000	12	.000		
	Total	.000	17			
ต้น	Between Groups	127.286	5	25.457	2735.706	.000
	Within Groups	.112	12	.009		
	Total	127.398	17			
ใบ	Between Groups	1.431	5	.286	186.626	.000
	Within Groups	.018	12	.002		
	Total	1.449	17			
ราก	Between Groups	1369.794	5	305.145	31603.007	.000
	Within Groups	.145	12	.010		
	Total	1369.939	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

ต้น

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		1.4967				
40	3			2.2167			
60	3				2.5433		
80	3					6.5200	
100	3						7.3233
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ใบ

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01		
		1	2	3
0	3	.0000		
20	3	.0000		
40	3	.0000		
60	3	.0000		
80	3		.5100	
100	3			.6700
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

ราก

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		2.0533				
40	3			5.9000			
60	3				10.8933		
80	3					15.8333	
100	3						27.1567
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ช-6 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
เมล็ด	Between Groups	.000	5	.000	.	.
	Within Groups	.000	12	.000		
	Total	.000	17			
เปลือก	Between Groups	.000	5	.000	.	.
	Within Groups	.000	12	.000		
	Total	.000	17			
ต้น	Between Groups	102.094	5	20.328	2160.036	.000
	Within Groups	.169	12	.009		
	Total	102.263	17			
ใบ	Between Groups	.899	5	.180	274.178	.000
	Within Groups	.008	12	.001		
	Total	.907	17			
ราก	Between Groups	814.526	5	186.776	5739.095	.000
	Within Groups	.386	12	.033		
	Total	814.912	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

ต้น

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		1.0733				
40	3			1.9200			
60	3				3.8400		
80	3					5.4500	
100	3						6.6667
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ใบ

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01		
		1	2	3
0	3	.0000		
20	3	.0000		
40	3	.0000		
60	3	.0000		
80	3		.4333	
100	3			.5100
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

ราก

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		1.2533				
40	3			3.8800			
60	3				6.6100		
80	3					10.9433	
100	3						21.3000
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ช-7 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
เมล็ด	Between Groups	.000	5	.000	.	.
	Within Groups	.000	12	.000		
	Total	.000	17			
เปลือก	Between Groups	.000	5	.000	.	.
	Within Groups	.000	12	.000		
	Total	.000	17			
ต้น	Between Groups	136.227	5	78.372	7060.523	.000
	Within Groups	.236	12	.011		
	Total	136.463	17			
ใบ	Between Groups	4.391	5	.878	1664.002	.000
	Within Groups	.006	12	.001		
	Total	4.397	17			
ราก	Between Groups	5221.136	5	1.349.759	255206.470	.000
	Within Groups	1.972	12	.005		
	Total	5223.108	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

ต้น

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		3.2267				
40	3			4.2600			
60	3				5.6500		
80	3					9.2467	
100	3						14.5667
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ใบ

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01			
		1	2	3	4
0	3	.0000			
20	3	.0000			
40	3		.4367		
60	3			.7800	
80	3			.8100	
100	3				1.4033
Sig.		1.000	1.000	.136	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

ราก

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		4.1233				
40	3			14.2767			
60	3				25.4767		
80	3					38.0067	
100	3						55.5100
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ช-8 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
เมล็ด	Between Groups	.000	5	.000	.	.
	Within Groups	.000	12	.000		
	Total	.000	17			
เปลือก	Between Groups	.000	5	.000	.	.
	Within Groups	.000	12	.000		
	Total	.000	17			
ต้น	Between Groups	92.804	5	19.815	4381.668	.000
	Within Groups	.246	12	.005		
	Total	93.050	17			
ใบ	Between Groups	3.564	5	.713	369.723	.000
	Within Groups	.023	12	.002		
	Total	3.587	17			
ราก	Between Groups	3126.049	5	1077.255	39291.985	.000
	Within Groups	.512	12	.027		
	Total	3126.561	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

ต้น

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		2.2433				
40	3			3.0700			
60	3				4.9433		
80	3					5.7967	
100	3						7.0167
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ใบ

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01				
		1	2	3	4	5
0	3	.0000				
20	3	.0000				
40	3		.3733			
60	3			.6100		
80	3				.7267	
100	3					1.2800
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

ราก

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		3.2167				
40	3			8.3333			
60	3				20.2500		
80	3					32.7967	
100	3						48.6600
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ช-9 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ผงกระดูกหมู	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
เมล็ด	5 กรัม	18	.0000	.00000(a)	.00000
	10 กรัม	18	.0000	.00000(a)	.00000
เปลือก	5 กรัม	18	.0000	.00000(a)	.00000
	10 กรัม	18	.0000	.00000(a)	.00000
ต้น	5 กรัม	18	3.3500	2.73752	.64524
	10 กรัม	18	3.1583	2.44654	.57666
ใบ	5 กรัม	18	.1967	.29197	.06882
	10 กรัม	18	.1572	.23093	.05443
ราก	5 กรัม	18	10.3061	9.47392	2.23303
	10 กรัม	18	7.3311	7.41330	1.74733

a t cannot be computed because the standard deviations of both groups are 0.

172

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
ต้น	Equal variances assumed	.346	.561	.221	34	.826	.19167	.86537	-2.16940	2.55274
	Equal variances not assumed			.221	33.579	.826	.19167	.86537	-2.17115	2.55448
ใบ	Equal variances assumed	2.588	.117	.450	34	.656	.03944	.08774	-.19995	.27884
	Equal variances not assumed			.450	32.287	.656	.03944	.08774	-.20070	.27959
ราก	Equal variances assumed	1.252	.271	1.049	34	.301	2.97500	2.83541	-4.76113	10.71113
	Equal variances not assumed			1.049	32.141	.302	2.97500	2.83541	-4.78758	10.73758

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

173

ตารางที่ ช-10 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ผงกระดูกหมู	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
เมล็ด	5 กรัม	18	.0000	.00000(a)	.00000
	10 กรัม	18	.0000	.00000(a)	.00000
เปลือก	5 กรัม	18	.0000	.00000(a)	.00000
	10 กรัม	18	.0000	.00000(a)	.00000
ต้น	5 กรัม	18	4.7783	2.83323	.66780
	10 กรัม	18	4.0672	2.33956	.55144
ใบ	5 กรัม	18	.5717	.50860	.11988
	10 กรัม	18	.4983	.45934	.10827
ราก	5 กรัม	18	23.0489	17.52831	4.13146
	10 กรัม	18	18.0617	13.56154	3.19649

a t cannot be computed because the standard deviations of both groups are 0.

174

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
ต้น	Equal variances assumed	.742	.395	.821	34	.417	.71111	.86605	-1.65181	3.07403
	Equal variances not assumed			.821	32.826	.418	.71111	.86605	-1.65681	3.07903
ใบ	Equal variances assumed	.379	.542	.454	34	.653	.07333	.16153	-.36739	.51406
	Equal variances not assumed			.454	33.653	.653	.07333	.16153	-.36766	.51432
ราก	Equal variances assumed	2.088	.158	.955	34	.346	4.98722	5.22365	-9.26495	19.23939
	Equal variances not assumed			.955	31.984	.347	4.98722	5.22365	-9.31811	19.29255

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

175

ตารางที่ ช-11 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ชนิดข้าว	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
เมล็ด	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	.0000	.00000(a)	.00000
	ข้าวเหนียวกข 6	18	.0000	.00000(a)	.00000
เปลือก	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	.0000	.00000(a)	.00000
	ข้าวเหนียวกข 6	18	.0000	.00000(a)	.00000
ต้น	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	3.3500	2.73752	.64524
	ข้าวเหนียวกข 6	18	6.1583	4.80191	1.13182
ใบ	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	.1967	.29197	.06882
	ข้าวเหนียวกข 6	18	.5717	.50860	.11988
ราก	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	10.3061	9.47392	2.23303
	ข้าวเหนียวกข 6	18	22.8989	19.92465	4.69628

a t cannot be computed because the standard deviations of both groups are 0.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

176

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
ต้น	Equal variances assumed	4.212	.048	-2.156	34	.038	-2.80833	1.30283	-6.36295	.74629
	Equal variances not assumed			-2.156	26.994	.040	-2.80833	1.30283	-6.41811	.80144
ใบ	Equal variances assumed	6.130	.018	-2.713	34	.010	-.37500	.13823	-.75214	.00214
	Equal variances not assumed			-2.713	27.107	.011	-.37500	.13823	-.75787	.00787
ราก	Equal variances assumed	11.756	.002	-2.422	34	.021	-12.59278	5.20014	-26.78082	1.59526
	Equal variances not assumed			-2.422	24.313	.023	-12.59278	5.20014	-27.12132	1.93576

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

177

ตารางที่ ช-12 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ชนิดข้าว	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
เมล็ด	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	.0000	.00000(a)	.00000
	ข้าวเหนียวกข 6	18	.0000	.00000(a)	.00000
เปลือก	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	.0000	.00000(a)	.00000
	ข้าวเหนียวกข 6	18	.0000	.00000(a)	.00000
ต้น	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	3.1583	2.44654	.57666
	ข้าวเหนียวกข 6	18	3.8450	2.41477	.56917
ใบ	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	.1572	.23093	.05443
	ข้าวเหนียวกข 6	18	.4983	.45934	.10827
ราก	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	7.3311	7.41330	1.74733
	ข้าวเหนียวกข 6	18	18.8761	17.80054	4.19563

a t cannot be computed because the standard deviations of both groups are 0.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

178

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
ต้น	Equal variances assumed	.058	.811	-.847	34	.403	-.68667	.81024	-2.89731	1.52397
	Equal variances not assumed			-.847	33.994	.403	-.68667	.81024	-2.89733	1.52400
ใบ	Equal variances assumed	6.961	.012	-2.815	34	.008	-.34111	.12118	-.67174	-.01049
	Equal variances not assumed			-2.815	25.077	.009	-.34111	.12118	-.67880	-.00342
ราก	Equal variances assumed	15.689	.000	-2.540	34	.016	-11.54500	4.54494	-23.94538	.85538
	Equal variances not assumed			-2.540	22.725	.018	-11.54500	4.54494	-24.31795	1.22795

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

179

ภาคผนวก ซ

ข้อมูลปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวสองสายพันธุ์ และข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS : One-way anova ที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ-1 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ข้าวขาวดอกมะลิ 105	**ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในต้นข้าว (mg/kg)**	**% แคดเมียม**	**ค่าเฉลี่ย**
ตัวอย่าง			
0/5-1	ND	ND	ND
0/5-2	ND	ND	
0/5-3	ND	ND	
20/5-1	3.53	4.42	4.44
20/5-2	3.49	4.36	
20/5-3	3.63	4.53	
40/5-1	7.96	4.97	5.07
40/5-2	8.14	5.09	
40/5-3	8.26	5.16	
60/5-1	13.34	5.56	5.60
60/5-2	13.51	5.63	
60/5-3	13.45	5.60	
80/5-1	22.79	7.12	7.14
80/5-2	22.91	7.16	
80/5-3	22.88	7.15	
100/5-1	34.81	8.70	8.79
100/5-2	35.02	8.76	
100/5-3	35.61	8.90	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ-2 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ข้าวขาวดอกมะลิ 105	**ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในต้นข้าว (mg/kg)**	**% แคดเมียม**	**ค่าเฉลี่ย**
ตัวอย่าง			
0/10-1	ND	ND	ND
0/10-2	ND	ND	
0/10-3	ND	ND	
20/10-1	2.22	2.77	2.91
20/10-2	2.25	2.82	
20/10-3	2.51	3.14	
40/10-1	5.61	3.51	3.62
40/10-2	5.88	3.67	
40/10-3	5.91	3.69	
60/10-1	10.69	4.45	4.35
60/10-2	10.50	4.38	
60/10-3	10.16	4.23	
80/10-1	16.39	5.12	5.26
80/10-2	16.97	5.30	
80/10-3	17.11	5.35	
100/10-1	28.77	7.19	7.12
100/10-2	28.40	7.10	
100/10-3	28.27	7.07	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ-3 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ข้าวเหนียว กข 6 ตัวอย่าง	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในต้นข้าว (mg/kg)	% แคดเมียม	ค่าเฉลี่ย
0/5-1	ND	ND	ND
0/5-2	ND	ND	
0/5-3	ND	ND	
20/5-1	7.38	9.23	9.19
20/5-2	7.23	9.03	
20/5-3	7.44	9.31	
40/5-1	19.05	11.91	11.86
40/5-2	18.94	11.83	
40/5-3	18.92	11.83	
60/5-1	31.74	13.22	13.29
60/5-2	31.94	13.31	
60/5-3	32.03	13.34	
80/5-1	48.12	15.04	15.02
80/5-2	48.08	15.03	
80/5-3	48.00	15.00	
100/5-1	71.65	17.91	17.87
100/5-2	71.67	17.92	
100/5-3	71.12	17.78	

ตารางที่ ซ-4 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมูที่ 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ข้าวเหนียว กข 6	**ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในต้นข้าว**	**%**	
ตัวอย่าง	**(mg/kg)**	**แคดเมียม**	**ค่าเฉลี่ย**
0/10-1	ND	ND	ND
0/10-2	ND	ND	
0/10-3	ND	ND	
20/10-1	5.43	6.79	6.83
20/10-2	5.42	6.78	
20/10-3	5.53	6.91	
40/10-1	11.76	7.35	7.36
40/10-2	11.79	7.37	
40/10-3	11.78	7.36	
60/10-1	26.17	10.90	10.75
60/10-2	25.91	10.80	
60/10-3	25.32	10.55	
80/10-1	38.93	12.17	12.29
80/10-2	39.61	12.38	
80/10-3	39.42	12.32	
100/10-1	57.03	14.26	14.24
100/10-2	57.08	14.27	
100/10-3	56.77	14.19	

ตารางที่ ซ-5 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

เปอร์เซ็นต์

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	20.161	5	26.659	5541.216	.000
Within Groups	.014	12	.005		
Total	20.175	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

เปอร์เซ็นต์

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		4.4367				
40	3			5.0733			
60	3				5.5967		
80	3					7.1433	
100	3						8.7867
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ซ-6 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

เปอร์เซ็นต์

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	13.049	5	17.207	1271.438	.000
Within Groups	.069	12	.014		
Total	13.118	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

เปอร์เซ็นต์

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		2.9100				
40	3			3.6233			
60	3				4.3533		
80	3					5.2567	
100	3						7.1200
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ซ-7 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

เปอร์เซ็นต์

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	65.410	5	116.032	20864.827	.000
Within Groups	.043	12	.006		
Total	65.453	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

เปอร์เซ็นต์

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		9.1900				
40	3			11.8567			
60	3				13.2900		
80	3					15.0233	
100	3						17.8700
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ซ-8 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway **ANOVA**

เปอร์เซ็นต์

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	42.446	5	77.213	9007.294	.000
Within Groups	.033	12	.009		
Total	42.479	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

เปอร์เซ็นต์

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		6.8267				
40	3			7.3600			
60	3				10.7500		
80	3					12.2900	
100	3						14.2400
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ซ-9 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ผงกระดูกหมู	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
เปอร์เซ็นต์	5 กรัม	18	5.1728	2.80079	.66015
	10 กรัม	18	3.8772	2.25175	.53074

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
เปอร์เซ็นต์	Equal variances assumed	.295	.590	1.529	34	.135	1.29556	.84705	-1.01552	3.60663
	Equal variances not assumed			1.529	32.501	.136	1.29556	.84705	-1.02182	3.61293

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

189

ตารางที่ ซ-10 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ผงกระดูกหมู	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
เปอร์เซ็นต์	5 กรัม	18	4.2378	1.96219	.46249
	10 กรัม	18	3.4239	1.58075	.37259

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
เปอร์เซ็นต์	Equal variances assumed	.464	.501	1.370	34	.180	.81389	.59390	-.80651	2.43429
	Equal variances not assumed			1.370	32.526	.180	.81389	.59390	-.81085	2.43863

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

190

ตารางที่ ซ-11 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ชนิดข้าว	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
เปอร์เซ็นต์	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	5.1728	2.80079	.66015
	ข้าวเหนียวกข 6	18	11.2050	5.84216	1.37701

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
เปอร์เซ็นต์	Equal variances assumed	6.059	.019	-3.950	34	.000	-6.03222	1.52708	-10.19869	-1.86576
	Equal variances not assumed			-3.950	24.422	.001	-6.03222	1.52708	-10.29708	-1.76737

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

191

ตารางที่ ซ-12 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ชนิดข้าว	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
เปอร์เซ็นต์	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	3.8772	2.25175	.53074
	ข้าวเหนียวกข 6	18	8.5778	4.76609	1.12338

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
เปอร์เซ็นต์	Equal variances assumed	9.197	.005	-3.783	34	.001	-4.70056	1.24244	-8.09043	-1.31068
	Equal variances not assumed			-3.783	24.229	.001	-4.70056	1.24244	-8.17280	-1.22831

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

192

ภาคผนวก ฌ

ข้อมูลปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวสองสายพันธุ์ และข้อมูลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS : One-way anova ที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฌ-1 ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ตัวอย่าง	ปริมาณแคดเมียมในดิน (mg/pot)	ค่าเฉลี่ย	ปริมาณแคดเมียมในดิน (mg/kg soil)	ค่าเฉลี่ย
0/5-1	ND	ND	ND	ND
0/5-2	ND		ND	
0/5-3	ND		ND	
20/5-1	77.18	77.19	19.30	19.30
20/5-2	77.22		19.31	
20/5-3	77.16		19.29	
40/5-1	156.25	156.27	39.06	39.07
40/5-2	156.37		39.09	
40/5-3	156.20		39.05	
60/5-1	235.87	235.92	58.97	58.98
60/5-2	235.96		58.99	
60/5-3	235.92		58.98	
80/5-1	314.58	314.59	78.65	78.65
80/5-2	314.63		78.66	
80/5-3	314.55		78.64	
100/5-1	391.89	391.91	97.97	97.98
100/5-2	391.91		97.98	
100/5-3	391.94		97.99	

ตารางที่ ฌ-2 ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ตัวอย่าง	ปริมาณแคดเมียมในดิน (mg/pot)	ค่าเฉลี่ย	ปริมาณแคดเมียมในดิน (mg/kg soil)	ค่าเฉลี่ย
0/10-1	ND	ND	ND	ND
0/10-2	ND		ND	
0/10-3	ND		ND	
20/10-1	77.62	77.60	19.41	19.40
20/10-2	77.58		19.40	
20/10-3	77.60		19.40	
40/10-1	156.46	156.49	39.12	39.12
40/10-2	156.51		39.13	
40/10-3	156.49		39.12	
60/10-1	236.12	236.11	59.03	59.03
60/10-2	236.13		59.03	
60/10-3	236.08		59.02	
80/10-1	314.85	314.85	78.71	78.71
80/10-2	314.89		78.72	
80/10-3	314.81		78.70	
100/10-1	392.02	391.97	98.01	97.99
100/10-2	391.97		97.99	
100/10-3	391.92		97.98	

ตารางที่ ฌ-3 ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ข้าวเหนียว กข 6 ตัวอย่าง	ปริมาณแคดเมียมในดิน (mg/pot)	ค่าเฉลี่ย	ปริมาณแคดเมียมในดิน (mg/kg soil)	ค่าเฉลี่ย
0/5-1	ND	ND	ND	ND
0/5-2	ND		ND	
0/5-3	ND		ND	
20/5-1	75.90	75.80	18.98	18.95
20/5-2	75.79		18.95	
20/5-3	75.70		18.93	
40/5-1	155.27	155.29	38.82	38.82
40/5-2	155.32		38.83	
40/5-3	155.28		38.82	
60/5-1	232.89	232.85	58.22	58.21
60/5-2	232.91		58.23	
60/5-3	232.76		58.19	
80/5-1	310.28	310.32	77.57	77.58
80/5-2	310.35		77.59	
80/5-3	310.33		77.58	
100/5-1	387.40	387.35	96.85	96.84
100/5-2	387.31		96.83	
100/5-3	387.35		96.84	

ตารางที่ ฌ-4 ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

ข้าวเหนียว กข 6 ตัวอย่าง	ปริมาณแคดเมียมในดิน (mg/pot)	ค่าเฉลี่ย	ปริมาณแคดเมียมในดิน (mg/kg soil)	ค่าเฉลี่ย
0/10-1	ND	ND	ND	ND
0/10-2	ND		ND	
0/10-3	ND		ND	
20/10-1	76.64	76.60	19.16	19.15
20/10-2	76.61		19.15	
20/10-3	76.56		19.14	
40/10-1	155.30	155.36	38.83	38.84
40/10-2	155.38		38.85	
40/10-3	155.41		38.85	
60/10-1	233.85	233.83	58.46	58.46
60/10-2	233.74		58.44	
60/10-3	233.89		58.47	
80/10-1	311.95	311.94	77.99	77.99
80/10-2	311.90		77.98	
80/10-3	311.97		77.99	
100/10-1	388.96	388.96	97.24	97.24
100/10-2	388.98		97.25	
100/10-3	388.93		97.23	

ตารางที่ ฌ-5 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

แคดเมียมในดิน

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2370337.264	5	474067.453	65911.207	.000
Within Groups	86.310	12	7.193		
Total	2370423.574	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

แคดเมียมในดิน

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		209.6967				
40	3			425.5733			
60	3				640.6833		
80	3					850.8100	
100	3						1059.6700
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ฌ-6 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

แคดเมียมในดิน

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2402035.529	5	480407.106	79504.400	.000
Within Groups	72.510	12	6.043		
Total	2402108.039	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

แคดเมียมในดิน

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		210.6933				
40	3			428.8733			
60	3				646.3300		
80	3					856.7933	
100	3						1066.1033
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ฌ-7 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

แคดเมียมในดิน

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2253761.912	5	450752.382	82226.909	.000
Within Groups	65.782	12	5.482		
Total	2253827.693	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

แคดเมียมในดิน

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		206.3867				
40	3			413.4367			
60	3				621.3400		
80	3					829.3800	
100	3						1034.9700
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ฌ-8 ข้อมูลวิเคราะห์สถิติปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

Oneway

ANOVA

แคดเมียมในดิน

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2309777.888	5	461955.578	82835.407	.000
Within Groups	66.921	12	5.577		
Total	2309844.810	17			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

แคดเมียมในดิน

Duncan[a]

ความเข้มข้น Cd	N	Subset for alpha = .01					
		1	2	3	4	5	6
0	3	.0000					
20	3		207.1067				
40	3			418.3700			
60	3				629.3767		
80	3					839.2567	
100	3						1046.7633
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ฌ-9 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ผงกระดูกหมู	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
แคดเมียมในดิน	5 กรัม	18	48.9961	34.53777	8.14063
	10 กรัม	18	49.0428	34.53404	8.13975

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
แคดเมียมในดิน	Equal variances assumed	.000	.999	-.004	34	.997	-.04667	11.51197	-31.45585	31.36252
	Equal variances not assumed			-.004	34.000	.997	-.04667	11.51197	-31.45585	31.36252

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

202

ตารางที่ ฌ-10 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวเหนียว กข 6 ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 และ10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ผงกระดูกหมู	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
แคดเมียมในดิน	5 กรัม	18	48.4017	34.11638	8.04131
	10 กรัม	18	48.6128	34.25948	8.07504

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
แคดเมียมในดิน	Equal variances assumed	.001	.980	-.019	34	.985	-.21111	11.39600	-31.30390	30.88167
	Equal variances not assumed			-.019	33.999	.985	-.21111	11.39600	-31.30393	30.88171

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

203

ตารางที่ ฌ-11 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 5 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ชนิดข้าว	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
แคดเมียมในดิน	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	48.9961	34.53777	8.14063
	ข้าวเหนียวกข 6	18	48.4017	34.11638	8.04131

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
แคดเมียมในดิน	Equal variances assumed	.005	.942	.052	34	.959	.59444	11.44257	-30.62541	31.81430
	Equal variances not assumed			.052	33.995	.959	.59444	11.44257	-30.62568	31.81457

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

204

ตารางที่ ฌ-12 เปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินของข้าวสองสายพันธุ์ ในชุดทดลองที่มีปริมาณผงกระดูกหมู 10 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

T-Test

Group Statistics

	ชนิดข้าว	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
แคดเมียมในดิน	ข้าวขาวดอกมะลิ105	18	49.0428	34.53404	8.13975
	ข้าวเหนียวกข 6	18	48.6128	34.25948	8.07504

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									99% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
แคดเมียมในดิน	Equal variances assumed	.002	.963	.038	34	.970	.43000	11.46568	-30.85289	31.71289
	Equal variances not assumed			.038	33.998	.970	.43000	11.46568	-30.85301	31.71301

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

205

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววรรณวิมล ธรรมมิกะ เกิดเมื่อวันพฤหัสบดีที่ 22 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนอยุธยาวิทยาลัย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย