

ผลของการเติมผงกระดูกหมูในการยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมของข้าวดอกมะลิ 105



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF SWINE BONE POWDER ON CADMIUM UPTAKE BY RICE (*Oryza sativa* L. var
Khao Dawk Mali 105)



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in Environmental Science
Inter-Department of Environmental Science
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

โดย

นางศศิธร เพชรแสน

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนุญ หนูจักร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.อนงนาฏ ศรีประโชติ)

ศศิธร เพชรแสน : ผลของการเติมผงกระดูกหมูในการยับยั้งการดูดตั้งแคดเมียมของข้าวดอกมะลิ 105. (

EFFECT OF SWINE BONE POWDER ON CADMIUM UPTAKE BY RICE (*Oryza sativa* L. var Khao Dawk Mali 105)) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์

การศึกษาผลของผงกระดูกหมูในการยับยั้งการดูดตั้งแคดเมียมที่ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในดินปนเปื้อนจากพื้นที่ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนได้แก่การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของผงกระดูกหมูและการศึกษาประสิทธิภาพของผงกระดูกหมูในการยับยั้งการดูดตั้งแคดเมียมของข้าวดอกมะลิ 105 การศึกษาโครงสร้างทางด้านกายภาพและเคมีของผงกระดูกหมู ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในสารละลาย รวมถึงการศึกษาไอโซโทมการดูดซับ พบว่า โครงสร้างทางด้านกายภาพและเคมีของผงกระดูกหมู มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบเฮกซาโกนัล มีแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อศึกษาไอโซโทมการดูดติดผิวในสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูงสุด 22.12 มิลลิกรัมต่อกรัม ไอโซโทมการดูดซับเป็นแบบแลงมัวร์

การศึกษาผลของการใช้ผงกระดูกหมูในการยับยั้งการดูดตั้งแคดเมียมของข้าวดอกมะลิ 105 ทำการปลูกข้าวในกระถางที่มีการเติมผงกระดูกหมูที่ระดับอัตรา 0%, 5%, 10% และ 15% ตามลำดับ ทดลองในสภาวะโรงเรือนทดลอง ทำการเพาะปลูก 2 ฤดูกาล ผลการทดลอง พบว่า ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 ข้าวเจริญเติบโตตามปกติ และออกรวงในทุกๆระดับความเข้มข้น ขณะที่ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ข้าวเริ่มมีการเจริญเติบโตได้ค่อนข้างต่ำ และเจริญเติบโตได้เพียงในระยะ 4 สัปดาห์แรก หลังจากนั้นเกิดอาการต้นเหลืองและยืนต้นตาย การสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ พบว่า มีการสะสมในรากมากกว่าลำต้น ใบ เมล็ด และเปลือก ความสามารถในการดูดตั้งแคดเมียม (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 อยู่ในช่วง 0.18-0.20 % และ 0.41-1.18 % ทั้งในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 และ 2 ตามลำดับ สำหรับค่าการสะสมของปริมาณแคดเมียมในส่วนของพืชระหว่างรากและดิน (BCF) มีค่าต่ำกว่า 1 และค่าการเคลื่อนย้ายแคดเมียมจากรากไปสู่ลำต้น (TF) มีค่าต่ำกว่า 1 แสดงถึงศักยภาพของผงกระดูกหมูในการสามารถยับยั้งการดูดตั้งแคดเมียมของพืชได้

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5587808020 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: SWINE BONE, CADMIUM UPTAKE, CONTAMINATED SOIL, ORYZA SATIVA L.

Sasithorn Pechrsan :

EFFECT OF SWINE BONE POWDER ON CADMIUM UPTAKE BY RICE (*Oryza sativa* L. var Khao Dawk Mali 105). Advisor: Prof. Thares Srisatit, Ph.D.

The study of effect of swine bone powder on cadmium uptake by rice (*Oryza sativa* L. var Khao Dawk Mali 105) was divided in to two parts; including; (i) efficiency of swine bone for Cd removal aqueous solution and (ii) application of swine bone to immobilization of Cd in *Oryza sativa* L. var Khao Dawk Mali 105 by green-house study. Characteristic of swine bone powder was studied and found that the main component are hexagonal structure, calcium hydroxyl-apatite. The results of batch experiment found that the highest percentage and adsorptive capacity of 10 mg/l at contact time 72 hours. Was 22.12 mg/g. The adsorption isotherm was fitted to Langmuir model

The results about the effects of swine bone powder n cadmium uptake by rice in green house at three different application rates of swine bone powder amended soil, including 5, 10 and 15%, respectively. The results showed that rice in rice in crop one could be normal grown and produce harvest under all conditions of swine bone powder application rates while, plant growth decreased in crop 2.

The efficiency of cadmium uptake in Khao Dawk Mali 105 rice were in range 0.18-0.20 % and 0.41-1.18 % at crop one and crop 2, respectively. Cadmium bioaccumulation in plant root to soil and translocation factor from root to shoot was less than one. Thus, swine bone powder can be inhibit of cadmium uptake in contaminated soil.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และตรวจสอบแก้ไข ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนให้ความเมตตาและอำนวยความสะดวกๆ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึง รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย และ อาจารย์ ดร.อนงนาฏ ศรีประโชติ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้ข้อเสนอแนะ คำแนะนำ และช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่ให้โอกาสในการลาศึกษาต่อและให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทางด้านวิทยาศาสตร์เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณน้องปธานิน แสงอรุณ และ น้องจรรยาธิษั วัฒนชัย ในการช่วยเหลือทุกๆ ด้านตลอดระยะเวลาการศึกษา รวมถึงพี่ๆ น้องๆ เพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนการศึกษาช่วยเหลือ ดูแลเอาใจใส่ และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดการทำวิทยานิพนธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูป.....	1
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	1
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	11
ชุดการทดลอง.....	127
ชุดการทดลอง.....	128
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	130
บรรณานุกรม.....	149
ประวัติผู้เขียน.....	151

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 การแบ่งประเภทของการเป็นสารก่อมะเร็งของแคดเมียมตามการแบ่งประเภทของหน่วยงานต่างๆ	10
ตารางที่ 2 มาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของธาตุโลหะหนักในดินที่ยอมรับได้	14
ตารางที่ 3 ปริมาณแคดเมียมที่ยอมให้มีได้ (Maximum Residue Level; MRL) ในอาหาร	14
ตารางที่ 4 มาตรฐานโลหะหนักของคุณภาพดิน (Soil Guideline Value) เพื่อทำการเพาะปลูก ..	15
ตารางที่ 5 อัตราการแทรกซึมลงและความสามารถในการอุ้มน้ำของดินที่ระดับความจุความชื้นปกติ	24
ตารางที่ 6 ค่าพีเอช (pH) ของดินที่เหมาะสมกับพืชบางชนิด.....	25
ตารางที่ 7 ค่าซีอีซีของดินในภาคต่างๆของประเทศไทย	26
ตารางที่ 8 ชนิดพืชที่สามารถเจริญเติบโตในดินที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างแตกต่างกัน.....	56
ตารางที่ 9 ระดับ CEC ของดิน.....	58
ตารางที่ 10 ปริมาณแคดเมียมในพืชชนิดต่างๆที่ปลูกในดินชนิดเดียวกัน	60
ตารางที่ 11 วิธีวิเคราะห์สมบัติต่างๆของกระดุกหมู.....	5
ตารางที่ 12 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินปนเปื้อนแคดเมียม.....	8
ตารางที่ 13 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรทั้งหมดของโพรงและขนาดโพรงของผงกระดุกหมู	14
ตารางที่ 14 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของผงกระดุกชนิดต่างๆ.....	15
ตารางที่ 15 ค่าคงที่ไอโซเทิร์มการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดุกหมูแบบแลงเมียร์	25
ตารางที่ 16 ค่าคงที่ไอโซเทิร์มการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดุกหมูแบบฟรอนดลิช	26
ตารางที่ 17 สมบัติต่างๆของดินก่อนการทดลอง	28
ตารางที่ 18 น้ำหนักแห้งของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1	30
ตารางที่ 19 น้ำหนักแห้งของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2.....	32
ตารางที่ 20 ความสูงของลำต้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1	34
ตารางที่ 21 ความสูงของลำต้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2	98

ตารางที่ 22 ผลผลิตเฉลี่ยของข้าวดอกมะลิ 105 หลังจากสิ้นสุดการทดลอง ที่ปลูกในดินปนเปื้อน แคดเมียมที่ปริมาณการเติมผงกระดูกหมูที่แตกต่างกัน	99
ตารางที่ 23 ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ตามปริมาณ การเติมผงกระดูกหมู ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1	103
ตารางที่ 24 ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ตามปริมาณ การเติมผงกระดูกหมู ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2	106
ตารางที่ 25 ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีในส่วนต่างๆของข้าวดอกมะลิ 105 ใน ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1	110
ตารางที่ 26 ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ตามปริมาณ การเติมผงกระดูกหมู ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2	112
ตารางที่ 27 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินหลังการเพาะปลูกในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1	114
ตารางที่ 28 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินหลังการเพาะปลูก ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2	115
ตารางที่ 29 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวใน ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1	117
ตารางที่ 30 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2	118
ตารางที่ 31 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1	119
ตารางที่ 32 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2	121
ตารางที่ 33 ปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1	122
ตารางที่ 34 ปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2	123
ตารางที่ 35 ค่า BCF และ TF ของแคดเมียมและสังกะสีในต้นข้าวดอกมะลิ 105 ที่มีการเติมผง กระดูกหมูในอัตราส่วนต่างๆในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1	125
ตารางที่ 36 ค่า BCF และ TF ของแคดเมียมและสังกะสีในต้นข้าวดอกมะลิ 105 ที่มีการเติมผง กระดูกหมูในอัตราส่วนต่างๆในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2	126

ตารางที่ 37	สมมูลมวลแคดเมียมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการเติมผงกระดูกในอัตรา ...	127
ตารางที่ 38	สมมูลมวลแคดเมียมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระดับการเติมผงกระดูกในอัตรา ที่แตกต่างกันในการเพาะปลูกที่ 2	128
ตารางที่ 39	ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของผงกระดูกหมูที่สภาวะต่างๆ.....	135
ตารางที่ 40	ปริมาณแคดเมียมคงเหลือในสารละลายที่พีเอชต่างๆ.....	136
ตารางที่ 41	ปริมาณแคดเมียมคงเหลือในสารละลายที่พีเอชต่างๆ.....	136
ตารางที่ 42	น้ำหนักแห้งรวมทั้งต้น ฤดูแล้งเพาะปลูกที่ 1.....	137
ตารางที่ 43	น้ำหนักแห้งรวมทั้งต้น ฤดูแล้งเพาะปลูกที่ 2.....	137
ตารางที่ 44	ปริมาณแคดเมียมในส่วนต้นของพืช ในฤดูแล้งเพาะปลูกที่ 1	138
ตารางที่ 45	ปริมาณแคดเมียมในส่วนรากของพืช ในฤดูแล้งเพาะปลูกที่ 1.....	138
ตารางที่ 46	ปริมาณแคดเมียมในส่วนต่างๆของพืช ในฤดูแล้งเพาะปลูกที่ 1	138
ตารางที่ 47	ปริมาณแคดเมียมในส่วนต้นของพืช ในฤดูแล้งเพาะปลูกที่ 2.....	139
ตารางที่ 48	ปริมาณสังกะสีในส่วนต้นของพืช ในฤดูแล้งเพาะปลูกที่ 1.....	139
ตารางที่ 49	ปริมาณสังกะสีในส่วนรากของพืช ในฤดูแล้งเพาะปลูกที่ 1	139
ตารางที่ 50	ปริมาณแคดเมียมในส่วนเมล็ดและเปลือกของพืช ในฤดูแล้งเพาะปลูกที่ 1	140
ตารางที่ 51	ปริมาณสังกะสีในส่วนต่างๆของพืช ในฤดูแล้งเพาะปลูกที่ 2.....	140
ตารางที่ 52	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินหลังการทดลองตามระยะเวลาการปลูกพืช	141
ตารางที่ 53	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินหลังการทดลองตามระยะเวลาการปลูกพืช	142

สารบัญรูป

รูปที่ 1 ส่วนประกอบของดิน.....	21
รูปที่ 2 กลไกการดูดซับ (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552).....	28
รูปที่ 3 ไอโซเทิร์มของการดูดซับตามการจำแนกของ IUPAC (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552).....	30
รูปที่ 4 ไอโซเทิร์มการดูดติดผิวแบบ Langmuir	32
รูปที่ 5 ไอโซเทิร์มการดูดติดผิวแบบ Freundlich.....	33
รูปที่ 6 ลักษณะของรากข้าวขาวดอกมะลิ 105.....	37
รูปที่ 7 ลักษณะของลำต้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105.....	38
รูปที่ 8 ลักษณะของ (ก) ช่อดอก และ (ข) ดอก	39
รูปที่ 9 ลักษณะของเมล็ด	40
รูปที่ 10 ระยะการเจริญเติบโตของข้าว	42
รูปที่ 11 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105.....	45
รูปที่ 12 โครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์	47
รูปที่ 13 โครงสร้างของผลึกแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์	47
รูปที่ 14 กลไกการดูดติดแคดเมียมในรูปเกลือคลอไรด์จากดินของพืช	51
รูปที่ 15 กระบวนการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation Processes).....	54
รูปที่ 16 ปฏิกริยาของแคลเซียมคาร์บอเนตกับอนุภาคของดินเหนียว	57
รูปที่ 17 ความสามารถของเนื้อดินในการดูดยึดโลหะ	59
รูปที่ 18 ขั้นตอนการเตรียมกระดูกหมูและผงกระดูกหมู.....	4
รูปที่ 19 กระดูกหมูที่ผ่านการเตรียมเบื้องต้น.....	11
รูปที่ 20 ผงกระดูกหมูที่ได้จากการเตรียมในสภาวะต่างๆ เพื่อใช้เป็นสารดูดซับ.....	12
รูปที่ 21 ลักษณะพื้นผิวของผงกระดูกหมู กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	13
รูปที่ 22 การเปรียบเทียบกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของผงกระดูกหมูก่อนและหลังการดูดซับ.....	16
รูปที่ 23 ผลวิเคราะห์ XRD ของการผงกระดูกหมูก่อนและหลังการดูดซับแคดเมียมในสารละลาย... 18	

รูปที่ 24 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของผงกระดูกหมู.....	19
รูปที่ 25 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของผงกระดูกหมู.....	21
รูปที่ 26 ผลของพีเอชต่อการตกตะกอนแคดเมียมในสารละลายเมื่อพีเอชเปลี่ยนแปลงไป.....	22
รูปที่ 27 ร้อยละการกำจัดแคดเมียมกับระยะเวลาสัมผัสของผงกระดูกหมู.....	23
รูปที่ 28 ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมของผงกระดูกหมูกับความเข้มข้นเริ่มต้น.....	24
รูปที่ 29 ไอโซเทิร์มการดูดซับแคดเมียมของผงกระดูกหมูแบบแลงเมียร์.....	25
รูปที่ 30 ไอโซเทิร์มการดูดซับแคดเมียมของผงกระดูกหมูแบบฟรุนดลิช.....	26
รูปที่ 31 น้ำหนักแห้งของต้นข้าวดอกมะลิ 105 ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 ที่ระยะเวลา 14 สัปดาห์... 30	
รูปที่ 32 น้ำหนักแห้งของต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ที่ระยะเวลา 14 สัปดาห์.....	32
รูปที่ 33 ความสูงเฉลี่ยของลำต้นข้าวขาวดอกมะลิ105 ที่ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1	33
รูปที่ 34 ความสูงเฉลี่ยของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2	97
รูปที่ 35 สัดส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวดอกมะลิ 105.....	104
รูปที่ 36 สัดส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวดอกมะลิ 105.....	106
รูปที่ 37 สัดส่วนความเข้มข้นของสังกะสีในส่วนต่างๆของข้าวดอกมะลิ 105	111
รูปที่ 38 ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105	113
รูปที่ 39 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินหลังการเพาะปลูกในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1	114
รูปที่ 40 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินหลังการเพาะปลูกในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2	115
รูปที่ 41 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1.....	117
รูปที่ 42 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2.....	118
รูปที่ 43 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1	120
รูปที่ 44 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2	121
รูปที่ 45 ปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1	122
รูปที่ 46 ปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2	123

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาการปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมครั้งใหญ่ในอดีตเคยเกิดขึ้นในกลุ่มน้ำจืดของประเทศญี่ปุ่น เมื่อปี ค.ศ. 1950 มีรายงานว่าสารแคดเมียมเป็นสาเหตุของการเกิดโรค "อิไตอิไต" พบว่ามีการศึกษาพบเส้นทางหลักของการรับสัมผัสสารแคดเมียมในผู้ป่วยมาจากการบริโภคข้าว ซึ่งเป็นผลผลิตจากพื้นที่เกษตรกรรมของกลุ่มน้ำจืด มีผู้บริโภคข้าวเสียชีวิตด้วยโรคอิไตอิไต 3 ราย ป่วย 48 ราย ต้องเฝ้าระวัง 136 ราย (ทัศนพรพรรณ ทองดีเลิศ, 2555)

เหตุการณ์คล้ายๆกันดังกล่าวได้เกิดขึ้นในประเทศไทย โดยพบแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมและพืชผลการเกษตร ในตำบลพระธาตุผาแดงและตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก จากรายงานการศึกษาของสถาบันการจัดการนํ้านานาชาติหรืออีมี (International Water Management Institute : IWMI) ในระยะแรก (ระหว่างปี พ.ศ. 2541 – 2543) สรุปผลการศึกษาพบความเข้มข้นของแคดเมียมในตัวอย่างดินที่เก็บจากที่นาจำนวน 154 แปลง มีค่าอยู่ในช่วง 3.4-284 mg/kg หรือคิดเป็น 1.13-94 เท่าของค่าอนุโลมสูงสุดที่ยอมให้มีได้ของสหภาพยุโรป (EU) (3.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) และคิดเป็น 1,800 เท่าของค่าเฉลี่ยแคดเมียมในดินของประเทศไทย (0.15 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) สำหรับคุณภาพเมล็ดข้าวซึ่งเก็บตัวอย่างจากที่นาจำนวน 90 แปลงพบแคดเมียมปนเปื้อน 0.1-44 mg/kg ซึ่งสูงเกินค่าเฉลี่ยแคดเมียมในข้าวของประเทศไทยที่พบเพียง 0.043 ± 0.019 mg/kg โดยค่าปนเปื้อนดังกล่าวร้อยละ 95 สูงเกินค่าอนุโลมสูงสุดที่ยอมให้มีได้ของ CODEX Committee on Food Additives and Contaminants (CCFAC) ซึ่งกำหนดไว้ที่ 0.4 mg/kg (CODEX, 2007)

ต่อมาในปี พ.ศ. 2544 – 2546 IWMI และกรมวิชาการเกษตร ได้ขยายพื้นที่การศึกษาต่อเนื่องจากช่วงแรก โดยทำการเก็บตัวอย่างดินนาข้าวจาก 343 แปลงนาที่ได้รับน้ำจากร่องน้ำชุดชลประทานที่ผันน้ำจากห้วยแม่ตาว บริเวณตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และสรุปผลว่าปริมาณการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินนาข้าวมีค่าระหว่าง 0.46-218 มิลลิกรัม/กิโลกรัมดิน หรือสูงถึง 72 เท่าของค่ามาตรฐานของสหภาพยุโรป (EU) และมากกว่า 1,450 เท่าของค่าเฉลี่ยแคดเมียมในดินของประเทศไทย สำหรับคุณภาพเมล็ดข้าวซึ่งเก็บตัวอย่างจากที่นาจำนวน 434 แปลง พบแคดเมียมปนเปื้อน $<0.01 - 7.7$ mg/kg โดยค่าปนเปื้อนดังกล่าวร้อยละ 84 (คิดเป็น 38.5 เท่า) สูงเกินค่าอนุโลมสูงสุดที่ยอมให้มีได้ของ CODEX

ในปี 2547 รัฐบาลได้อนุมัติเงินจำนวน 92 ล้านบาท เพื่อซื้อข้าวมาทำลายทิ้ง หน่วยงานภาครัฐทั้งระดับรัฐบาลและในพื้นที่ต้องเข้ามาแก้ไขปัญหาให้เกษตรกร ทั้งการจ่ายเงินชดเชย หรือส่งเสริมให้เกษตรกรปลูกพืชชนิดอื่นแทนการปลูกข้าว เช่น อ้อย ซึ่งสภาพพื้นที่การปลูกอ้อยที่เหมาะสมนั้นต้องเป็นพื้นที่สูงแต่ปัจจุบันพื้นที่ปลูกอ้อยส่วนมากเป็นพื้นที่ลุ่มน้ำ การเอาพื้นที่ทำนาไปปลูกอ้อยจึงไม่คุ้มค่ากับการลงทุนทำให้เกษตรกรบางรายไม่ยอมเปลี่ยนไปปลูกพืชตัวอื่นที่ภาครัฐส่งเสริม โดยเกษตรกรส่วนใหญ่มีความเห็นตรงกันว่าปลูกพืชอื่นขายแล้วได้เงินมาก็จริง แต่ต้องเอาไปซื้อข้าวกินอยู่ดี ปลูกข้าวแล้วเก็บไว้กินเหลือก็แบ่งไปขายได้ทั้งข้าวได้ทั้งเงิน แม้มีข้อมูลระบุว่าพบสารแคดเมียมปนเปื้อนในดินและพืชในพื้นที่ทำกิน แต่เมื่อไม่มีความชัดเจนเพราะบางแปลงก็ตรวจพบแต่บางแปลงก็ตรวจไม่พบแคดเมียม ทำให้เกษตรกรไม่มั่นใจว่าพื้นที่ปลูกข้าวมีสารแคดเมียมปนเปื้อนอยู่จริง รวมทั้งโรคที่เกิดจากการได้รับสารแคดเมียมส่วนใหญ่ไม่ใช่โรคเฉียบพลันรุนแรง จึงไม่มีใครสนใจข้อมูลที่หน่วยงานภาครัฐออกมาเตือน จนถึงปัจจุบันนี้ก็ยังไม่พบว่าชาวบ้านทั้ง 3 ตำบล ยังปลูกข้าว และกินข้าวที่ปลูกในพื้นที่ที่ถูกระบุว่ามีการปนเปื้อนของสารแคดเมียมกันอยู่ (จันจิรา จารุศุภวัฒน์, 2553) ซึ่งปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นควรได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน โดยเฉพาะการให้เกษตรกรสามารถปลูกข้าวหรือดำเนินวิถีชีวิตอย่างเดิมได้โดยไม่ต้องอพยพโยกย้ายหรือเปลี่ยนวิถีชีวิตที่เคยดำเนินมา

การจัดการโลหะหนักที่สะสมในดินนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ วิธีทางกายภาพ เช่น soil washing เป็นวิธีที่ใช้ตัวทำละลายในการล้างดินเพื่อแยกโลหะหนักออกจากเนื้อดิน วิธีทางเคมี เช่น stabilization ใช้หลักการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักไม่ให้เกิดการเคลื่อนย้ายสู่สิ่งแวดล้อม และวิธีทางชีวภาพ เช่น Phytoremediation ใช้พืชในการบำบัดดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก มีค่าใช้จ่ายน้อย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ใช้เวลาในการบำบัดนาน (Khan, Husain, & Hejazi, 2004) อีกวิธีการหนึ่งคือการลดการปนเปื้อนในพื้นที่โดยการใช้สารบางชนิด เช่น อะพาไทต์ ซึ่งวิธีการนี้ถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ซึ่งจะช่วยการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักและลดการดูดซับโลหะหนักเข้าสู่พืชได้

กระดูกสัตว์มีแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$; CaHAP เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตรูปแบบหนึ่ง โดยจะเป็นตัวกำจัดสารประเภทโมเลกุลบวกประเภทไอออนอินทรีย์ได้หลายชนิด ด้วยแรงทางประจุซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวบนผิวดังนั้นจึงปัจจัยที่ทำให้กระดูกมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ทั้งในดินและในน้ำ (Ko et al., 2004) (Chen, Zhu, Ma, & McKay, 2006) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกระดูกในการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินปนเปื้อน ซึ่งพบว่าการเติมถ่านกระดูกสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนที่ของตะกั่วในดินได้ โดยสามารถลดความเข้มข้นของตะกั่วขึ้นสู่ลำต้นและรากได้ถึงร้อยละ 56 และ 75.9 ตามลำดับ

วัตถุประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้ต้องการที่จะศึกษาถึงประสิทธิภาพของผงกระดูกหมูในการยับยั้งการดูดซับแคดเมียมในดินปนเปื้อน โดยปลูกข้าวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L. var Khao Dawk Mali 105) เพื่อเป็นดัชนีชี้วัด และศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำผงกระดูกหมูมาใช้ยับยั้งหรือลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในพื้นที่จริงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของผงกระดูกหมูในการกำจัดแคดเมียมออกจากสารละลายแคดเมียม

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของผงกระดูกหมูในการยับยั้งการดูดซับแคดเมียมของข้าวดอกมะลิ 105

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การศึกษาในห้องปฏิบัติการ

1) สารดูดซับที่ใช้ในการศึกษาคือผงกระดูกหมู ซึ่งเตรียมจากกระดูกขาหน้า ต้มที่อุณหภูมิ 60, 80, 100 °C เวลา 3, 6 และ 9 ชั่วโมง และผ่านการบดและร่อนที่ขนาด 100 เมช

2) การศึกษาประสิทธิภาพของผงกระดูกหมูในการกำจัดแคดเมียมจากสารละลายแคดเมียมในเตรท

3) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผงกระดูกหมู ได้แก่ ลักษณะโครงสร้างพื้นผิว (SEM) พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรของโพรง (BET) , ธาตุองค์ประกอบ (XRF), โครงสร้างผลึก (XRD), กลุ่มองค์ประกอบสารอินทรีย์ (FTIR), ความจุในการดูดซับสูงสุด (adsorption capacity) และ ไอโซเทอรั่มการดูดซับ (adsorption isotherm)

1.3.2 การศึกษาในเรือนทดลอง

1) ผงกระดูกหมูที่เตรียมจากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการจะถูกนำมาใช้ในส่วนการศึกษาในเรือนทดลอง

2) ดินที่นำมาศึกษาในครั้งนี้คือดินปนเปื้อนแคดเมียม ซึ่งเก็บจากพื้นที่ทำการเกษตรที่บ้านพะเต๊ะ ต.พระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

3) ข้าวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ข้าวดอกมะลิ 105 ซึ่งนำมาจากศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวจังหวัดร้อยเอ็ด

4) ทำการเติมผงกระดูกหมูลงในดินปนเปื้อนแคดเมียมในอัตราส่วน 5%, 10% และ 15% เติมปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตราส่วน 0.27 กรัมต่อกระถาง

5) ต้นข้าวเจริญเติบโตภายใต้แสงและอุณหภูมิในธรรมชาติ โดยแบ่งระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ระยะแตกหน่อ (6 สัปดาห์) ระยะออกดอก (10 สัปดาห์) และระยะออกรวง (14 สัปดาห์) และหลังจากเก็บเกี่ยวแล้วจึงนำมาวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของต้นข้าว ได้แก่ ราก ลำต้น เมล็ด และเปลือก

6) วางแผนการทดลองแบบ CRD (Completely Randomize Design) และวิเคราะห์ความแตกต่างของการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าว ในอัตราส่วนของผงกระดูกหมูที่แตกต่างกัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียม ณ พื้นที่จริงได้ เช่น พื้นที่ปลูกข้าวบริเวณบ้านพะเด๊ะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

1.4.2 เพื่อให้เกษตรกรยังคงทำการเพาะปลูกข้าวและมีอาหารบริโภคได้โดยไม่มีภัยอันตราย

1.4.3 เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แคดเมียม (Cadmium)

2.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของแคดเมียม

แคดเมียมเป็นโลหะกรุป II B ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 48 น้ำหนักอะตอม 112.40 มีวาเลนซ์ 2 มีไอโซโทปที่เสถียร 8 ไอโซโทป แคดเมียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวสามารถตีเป็นแผ่นได้ ที่เป็นผงมีลักษณะสีเทาอ่อน เงามาวหรือสีฟ้าอ่อน เมื่อถูกความชื้นในอากาศจะหมองและฟูกร่อน ไตที่อุณหภูมิ 80°C จะเปราะ มีความทนต่อต่าง ความถ่วงจำเพาะ 8.642 จุดหลอมเหลว 320.9°C จุดเดือด 767°C ค่าดัชนีหักเห 1.13 ความแข็ง (Mohs hardness) 2.0 มีรัศมีของไอออนในผลึก (ionic radius in crystals) อยู่ในช่วง 0.78-1.31 อังสตรอม (Lide, 2012) ละลายได้ดีในกรด โดยเฉพาะกรดไนตริก ละลายได้ในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรท (Lewis & Hawley, 2016) และละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริกอย่างช้าๆ ซึ่งจะเห็นว่าแคดเมียมมีความสามารถละลายได้ในกรดอ่อน จากคุณสมบัติข้อนี้แคดเมียมจึงเป็นอันตรายต่อมนุษย์แบบเฉียบพลันเมื่อได้รับเข้าไป

ตัวอย่างของสารประกอบแคดเมียม เช่น Cadmium sulfate (CdSO_4) Cadmium chloride (CdCl_2) และ Cadmium nitrate ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$) เป็นสารประกอบที่ไม่มีสีและละลายน้ำได้ดี นอกจากนี้แคดเมียมสามารถรวมกับสารอื่นๆเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถละลายน้ำได้ โดยเฉพาะเมื่อรวมตัวกับ cyanides และ amines

2.1.2 แหล่งกำเนิดแคดเมียม

ในธรรมชาติแคดเมียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแคดเมียมซัลไฟด์ มักพบแคดเมียมร่วมกับแร่สังกะสี ดังนั้นผลิตผลพลอยได้จากการถลุงสินแร่สังกะสี คือ แคดเมียม แหล่งการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินมาจาก 3 แหล่งใหญ่ ได้แก่ 1) เหมืองแร่สังกะสีและตะกั่ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนการถลุงแร่ 2) กากตะกอนน้ำโสโครก เช่น น้ำเสียหรือกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรม โดยกลุ่มสหภาพยุโรป (EU) และประเทศอิตาลีกำหนดความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ของแคดเมียมในกากตะกอนน้ำเสียที่จะมาใช้ในการเกษตร มีค่าเท่ากับ 1-3 mg/kg (น้ำหนักแห้ง) และ 1.5 mg/kg (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ (Moolenaar & Beltrami, 1998) และ 3) ปุ๋ย เช่น ปุ๋ยฟอสเฟต และปุ๋ยคอก ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินปกติมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-0.7 mg/kg ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (2540) รายงานว่า บริเวณและพื้นที่ใกล้แหล่งเหมืองแร่สังกะสีโดยทั่วไป มักพบการปนเปื้อน

แคดเมียมร่วมกับสังกะสีในอัตราส่วนระหว่างแคดเมียมต่อสังกะสีประมาณ 1:1,000 และบริเวณรอบเหมืองแร่สังกะสีในรัศมี 1 กิโลเมตร มีการปนเปื้อนแคดเมียมในปริมาณสูงถึง 1,750 mg/kg นิตยาพร ตันมณี และ จุไร ทองมาก (2537) ศึกษาดินในพื้นที่ที่เสี่ยงต่อการปนเปื้อนแคดเมียมบางแห่งในประเทศไทย เช่น บริเวณพื้นที่ที่ทำการเกษตรใกล้กับโรงงานถลุงแร่สังกะสี และพื้นที่ที่เคยได้รับน้ำเสียและกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานในจังหวัดตาก พบว่าปริมาณแคดเมียมทั้งหมดของตัวอย่างดินที่เก็บในพื้นที่ห่างจากโรงงานถลุงแร่สังกะสีประมาณ 1.5 กิโลเมตร มีปริมาณแคดเมียมเฉลี่ย 1.35 mg/kg และตัวอย่างดินในพื้นที่ที่ได้รับน้ำเสียและกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานพบปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยสูงสุด 51.25 mg/kg

2.1.3 การใช้ประโยชน์ของแคดเมียม (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

แคดเมียมถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆและสินค้าอุปโภคดังนี้

2.1.3.1 ใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสมอัลลอยด์ (alloy) เพื่อเพิ่มความเหนียวและความทนทานต่อการกัดกร่อน เช่น อัลลอยด์ของทองแดงที่มีแคดเมียม 1% (Cadmium bronze) ใช้ในการผลิตเส้นลวดโทรเลขและโทรศัพท์ อัลลอยด์ของทองแดงและตะกั่ว ซึ่งมีแคดเมียมผสมอยู่ 20% ใช้ในการผลิตแบบพิมพ์ (Printing plates) อัลลอยด์ของทองแดง แคดเมียม และเซอร์โคเนียม ใช้ในอุปกรณ์การสื่อสารต่างๆที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงๆ ทั้งนี้เพราะโลหะผสมประเภทนี้ จะมีความแข็งและมีแรงดึงได้สูงกว่าโลหะผสมของทองแดงกับแคดเมียม ใช้ผสมกับโลหะอื่นในอุตสาหกรรมเพชรพลอย และเครื่องประดับ อัญมณีต่างๆ โดยอาจผสมกับโลหะชนิดอื่นชนิดเดียว (ผสมทอง) ผสมกับโลหะอื่น 2 ชนิด (ทอง 75% เงิน 16,6%) ผสมกับโลหะอื่น 3 ชนิด (ทองแดง เงิน และทอง) ใช้แคดเมียมที่มีความบริสุทธิ์สูงๆในการผสมกับโลหะอื่น เพื่อให้มีคุณสมบัติกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น cadmium arsenic, cadmium antimonide และ cadmium telluride

2.1.3.2 ใช้ในการชุบโลหะ โดยใช้แคดเมียมเคลือบบนแผ่นเหล็ก ทองแดง อะลูมิเนียม โดยการชุบด้วยไฟฟ้า โลหะที่ได้จากการชุบนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และวิทยุ เป็นต้น

2.1.3.3 ใช้เป็นเม็ดสีในอุตสาหกรรม สารประกอบแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลโฟซิลิเกตในการให้สีในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น สีอานาเมลล เซรามิก ยาง แก้ว ผ้า เส้นใย หนังกมิกพิมพ์ และพลาสติก

2.1.3.4 ใช้ผลิตแบตเตอรี่ โดยใช้ร่วมกับโลหะนิกเกิลเป็น Cd-Ni battery ซึ่งนำมาใช้เป็นแบตเตอรี่ในเครื่องคิดเลข แพลซถ่ายารูป เครื่องโกนหนวด นาฬิกา และวิทยุเล็กๆ เป็นต้น

2.1.1.5 ใช้ในกิจการอื่นๆ เช่น ใช้ผสมในสารฆ่าเชื้อราที่ใช้ในกิจการเกษตร ใช้ในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู เป็นตัวควบคุมอัตราการแตกตัวของนิวเคลียร์ ใช้ในการผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์ ใช้ในการถ่ายรูป เช่น Cd—Br, Cd—I ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวของพลาสติก เช่น cadmium stearate และใช้ในการผลิตอุปกรณ์ต่างๆที่ต้องทนความร้อน เช่น ทำหม้อน้ำรถยนต์ อุปกรณ์ทำความเย็นต่างๆที่ต้องระบายความร้อนมากๆ

2.1.4 ความเป็นพิษของแคดเมียม

จากการที่แคดเมียมถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมและสินค้าอุปโภคบริโภคที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงทำให้โลหะแคดเมียมเกิดการปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม บรรยากาศและในอาหาร ทำให้แคดเมียมสามารถเข้าไปสะสมในร่างกายทั้งในระบบทางเดินหายใจ ผิวหนัง และระบบทางเดินอาหาร ซึ่งส่วนใหญ่ได้รับโดยผ่านการรับประทานอาหารและการหายใจเอาฝุ่นละอองหรือไอโลหะเข้าไป ก่อให้เกิดการสะสมแคดเมียมในไตและตับ แสดงความเป็นพิษเรื้อรังต่ออวัยวะในร่างกาย เช่น ปอด ระบบเลือด กระดูกพรุน และโรคไตไตอักเสบ เป็นต้น ค่าความเป็นพิษอย่างเฉียบพลันอยู่ในปริมาณ 350-3,500 มิลลิกรัม และปริมาณที่มีผลทำให้ตายได้อยู่ที่ 1,530-8,900 มิลลิกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) ในการรับประทานอาหารของคนไทยได้รับปริมาณแคดเมียมจากพืช 28.82 ไมโครกรัมต่อวัน โดยแคดเมียมในอาหารจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยผ่านทางลำไส้ร้อยละ 3-8 ระบบทางเดินหายใจดูดซึมร้อยละ 13-15 ที่ได้รับร้อยละ 13.8 และที่ตับอ่อนร้อยละ 3.3 ในช่วงระยะเวลา 1 วัน แคดเมียมสามารถสะสมไว้ในร่างกาย 2 ไมโครกรัม บางครั้งอาจสูงถึง 3-4 ไมโครกรัมในผู้ที่สูบบุหรี่จัด (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามอายุ เนื่องจากค่าครึ่งชีวิต (biological half life) ของแคดเมียมยาวจึงทำให้การสลายตัวของแคดเมียมใช้เวลานาน 16-33 ปี ผลระยะยาวเมื่อได้รับแคดเมียม 30-40 มิลลิกรัมต่อวันเป็นเวลานาน จะมีผลเสียโดยตรงกับการสร้างกระดูกและจะไม่มีการสะสมของคอเลสเตอรอลในกระดูก โดยที่แคดเมียมเป็นตัวการที่ทำให้เอนไซม์ไลโซออกซิเดส (lysyl oxidase) หมดประสิทธิภาพ จึงทำให้กระดูกอ่อนเสียรูปและทำให้เจ็บปวดมาก เรียกโรคนี้ว่า โรคไตไตอักเสบ (Itai-Itai) นอกจากนี้แคดเมียมมีผลเสียต่อการทำงานของร่างกายทุกระบบ สำหรับสัตว์ที่ได้รับแคดเมียมประมาณ 1,300 ไมโครกรัมต่อวันจะเกิดโรคโลหิตจาง ความดันโลหิตสูง อัตราการเจริญเติบโตช้าและมีอายุสั้น (ยุพดี เสตพรรณ, 2544) โดยความเป็นพิษของแคดเมียมแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะดังนี้

2.1.4.1 ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน

ความเป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหาร เมื่อร่างกายได้รับแคดเมียมโดยการกินซึ่งส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการกินอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีแคดเมียมปนเปื้อนหรือบรรจุในภาชนะที่เคลือบด้วยแคดเมียม อาการที่ปรากฏเริ่มแรกคือ รู้สึกคลื่นเหียนอย่างรุนแรง อาเจียน ท้องร่วง เป็นตะคริว และน้ำลายฟูมปาก ในรายที่เป็นมากอาจเกิดอาการช็อกเนื่องจากร่างกายสูญเสียน้ำมาก ระบบการทำงานของไตล้มเหลวและอาจถึงตายได้ ความเป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจ การสูดหายใจเอาไอของแคดเมียมเข้าไปทำให้เกิดอาการระคายเคืองที่หลอดลม ปอด จมูก ลำคอ และยังทำให้เกิดอาการไอ เวียนศีรษะ อ่อนเพลีย หนาวสั่น มีไข้ เจ็บหน้าอก เป็นต้น

2.1.4.2 ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง

ความเป็นพิษจากแคดเมียมที่เกิดกับคนส่วนใหญ่มักเป็นแบบชนิดเรื้อรัง ซึ่งเกิดจากการที่ร่างกายได้รับแคดเมียมเข้าไปเป็นเวลานานติดต่อกัน ได้แก่ ความเป็นพิษต่อปอดในคนที่หายใจเอาฝุ่นหรือไอ (fume) ของแคดเมียมเข้าไปติดต่อกันเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดการบวมหรือฟองของเนื้อเยื่อปอด ประสิทธิภาพในการระบายลมของปอดจะลดลง ทำให้อากาศอยู่ภายในปอดนานกว่าปกติ มีอาการหายใจขัดหรือหายใจไม่ออก นอกจากนี้ยังพบว่า แคดเมียมทำให้เกิดโรคถุงลมโป่งพองและมีพังผืดในปอดจับในทางเดินหายใจส่วนล่าง เนื่องจากแคดเมียมจะเป็นตัวไปขัดขวางการสร้าง antitrypsin ซึ่งเป็นตัวควบคุม trypsin ในร่างกายคน ซึ่งสาร trypsin นี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคถุงลมโป่งพองได้ ความเป็นพิษต่อไต ผู้ที่ได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายนานติดต่อกันจะพบความเป็นพิษที่ไตก่อนที่ปอด จะเกิดแผลที่ไต พิษต่อไตจะปรากฏโดยผู้ป่วยมีอาการของโปรตีนยูเรีย คือ ไตจะมีการขับปัสสาวะที่มีโปรตีนมากกว่าปกติ ซึ่งโปรตีนที่ขับออกมาส่วนใหญ่จะเป็นโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น microglobulin lysozyme ribonuclease retinol binding protein และ immunoglobulin chains โดยชนิดของโปรตีนที่ถูกขับออกมาเป็นตัวบอกให้รู้ว่าไตส่วนใดถูกทำลาย เช่น ถ้าโปรตีนขนาดใหญ่ถูกขับออกมา แสดงว่า โกลเมอรูลัส (glomerulus) ถูกทำลาย แต่ถ้าเป็นโปรตีนขนาดเล็กถูกขับออกมา แสดงว่า ส่วนของทิวบูลถูกทำลาย นอกจากโปรตีนแล้วยังอาจมีสารอื่นๆถูกขับออกมากผิดปกติด้วย เช่น กรดอะมิโน ทำให้เกิดอาการ aminoaciduria แคลเซียม ทำให้เกิดอาการ hypercalcemia และกลูโคส ทำให้เกิดอาการ glucosuria เป็นต้น ความเป็นพิษที่กระดูก ที่ปรากฏเด่นชัดในกรณีการเกิดโรคออสติโอโอสโตโรซิส โรคนิ่วนี้เป็นโรคกระดูก คือ กระดูกจะพรุน กระดูกโค้ง งอโค้งได้ จะทำให้กระดูกเสียรูปทรง แตกร้าวและหักได้ เนื่องจากร่างกายดูดซึมแคลเซียมได้น้อยลง ความเป็นพิษต่อระบบเลือดเข้าสู่หัวใจและระบบการสร้างเม็ดโลหิต จะทำให้เกิดความดันโลหิตสูง เป็นสาเหตุให้เกิดโรคหัวใจ หัวใจเต้นผิดปกติในกลุ่มผู้ป่วยที่เป็นโรคออสติโอโอสโตโรซิส และกลุ่มคนงานที่ต้องสัมผัสกับแคดเมียมจะพบอาการของโรคโลหิตจางด้วย ความเป็นพิษต่อดับ มีรายงานค่อนข้างน้อยเกี่ยวกับความเป็นพิษต่อดับในคน แต่จากการทดลองในสัตว์ทดลอง

พบว่า แคดเมียมในปริมาณน้อย (ในน้ำดื่ม 1ppm) มีผลทำให้การทำงานของเอ็นไซม์ในตับเปลี่ยนไปจากการทดลองในสัตว์ พบว่า แคดเมียมยังเป็นสารก่อมะเร็งโดยทำให้เกิดมะเร็งของเนื้อเยื่อที่อยู่ลึก (Sarcomar) เช่น กล้ามเนื้อกระดูกในหนูทดลอง

ในปี 2489 ได้พบโรคอิไต-อิไต (Itai-Itai disease) ที่เมืองโทมายะ ประเทศญี่ปุ่น โดยแพทย์ชื่อ Dr.Noboru Hagino อันเกิดมาจากโรงงานงานผลิตแร่ทองคำ ตะกั่ว สังกะสี ของบริษัทมิตซึบิชิ ที่มีการปล่อยน้ำเสียปะปนกับน้ำธรรมชาติเข้าสู่ไร่นาที่ปลูกข้าวและพืชผักต่างๆ โดยมีรายงานว่าพบปริมาณแคดเมียมที่ผิวดินนาอยู่ในช่วง 1.35-6.88 mg/kg เป็นเวลามากกว่า 30 ปี ให้มีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ในเมล็ดข้าว และเป็นเหตุให้แคดเมียมเข้าสู่ร่างกาย ก่อให้เกิดอาการโรคพิษแคดเมียม โยอาการเริ่มเป็นที่ไตล้มเหลว ปวดกระดูกตามร่อง ซี่โครง และสันหลัง จนถึงกระดูกผิดรูป โดยพบมากที่สุดหญิงที่มีบุตรแล้ว (สุรณี โรจน์อารยานนท์, 2532; ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545; Bradl, 2005)

2.1.5 การเข้าสู่ร่างกายและกลไกการเกิดพิษ (เกศิณี พุกลานนท์, 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-เมทัลโลธัยโอริง อัตราการขับออกทางปัสสาวะค่อนข้างต่ำ และจำนวนเล็กน้อยถูกขับออกมาทางเหงื่อ น้ำลาย ผม และเล็บ

พิษเรื้อรังจากแคดเมียมอาจเป็นพิษเฉพาะที่ ได้แก่ ผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ การทำลายไต การมีโปรตีนในปัสสาวะ และการเกิดโรคโลหิตจาง เป็นต้น

การได้รับแคดเมียมเป็นเวลานานมักพบลักษณะของกระดูกผิดปกติ ได้แก่ กระดูกโพรง กระดูกพรุน และกระดูกหักง่าย ทำให้ผู้ป่วยมีอาการปวดกระดูกและเดินลำบาก ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นผลของแคดเมียมต่อเมทาบอลิซึมของกระดูกโดยตรง และแคดเมียมยังก่อให้เกิดการแตกทำลายของเม็ดเลือดแดงเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดการขาดธาตุเหล็ก ก่อให้เกิดอาการซีดชนิด hypochromic ซึ่งเป็นชนิดที่พบบ่อยในผู้ที่ได้รับแคดเมียมเข้าไปในระดับสูง

แคดเมียมได้รับการจัดว่าเป็นสารก่อมะเร็งของ IARC (International Agency for Research on Cancer) Group 1 และ ACGIH (The American Conference of Governmental Industrial Hygiene) A2 (<https://monographs.iarc.fr/list-of-classifications-volumes/>) (ตารางที่ 1) เมื่อได้รับแคดเมียมทำให้เกิดมะเร็งในต่อมลูกหมากเพิ่มมากขึ้น จากงานวิจัยของ (Waalkes, 2003) พบว่า แคดเมียมถูกจัดเป็นสารก่อมะเร็งโดยเฉพาะมะเร็งปอด และการสัมผัสกับแคดเมียมยังมีส่วนเกี่ยวข้องกับมะเร็งต่อมลูกหมากและไต แต่ไม่รุนแรงเท่ากับมะเร็งปอด นอกจากนี้มีรายงานการศึกษาจากหลายฉบับที่แสดงถึงแนวโน้มว่าแคดเมียมเป็นสารก่อมะเร็ง โดยมีการทดลองให้ CdS_2 และ $CdSO_4$ ใต้ผิวหนังและกล้ามเนื้อสัตว์ทดลอง พบว่าก่อให้เกิดมะเร็งชนิด sarcoma ณ บริเวณนั้น และสามารถแพร่ไปยังต่อมน้ำเหลืองและปอดได้

ตารางที่ 1 การแบ่งประเภทของการเป็นสารก่อมะเร็งของแคดเมียมตามการแบ่งประเภทของหน่วยงานต่างๆ

หน่วยงาน	การแบ่งประเภทสารก่อมะเร็ง	ความหมาย
Environmental Protection Agency (EPA)	B1	มีความเป็นไปได้สูงในการก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์
International Agency for Research on Cancer (IARC)	1	ยืนยันว่าเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์
American Conference of Industrial Hygienists (ACGIH)	A2	สงสัยว่าเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์
National Toxicology Program (NTP)	K	ยืนยันว่าเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์
Occupational Safety and Health Administration (OSHA)	Yes	ยืนยันว่าเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ และในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

ที่มา : ดัดแปลงจาก <https://publicsafety.tufts.edu/ehs/files/carcinogens.pdf>

2.1.6 แคดเมียมในดิน

แคดเมียมในหินอัคนีและหินตะกอนจะมีปริมาณไม่เกิน 0.3 mg/kg และจะพบอยู่ร่วมกับสังกะสีเสมอ แต่ในสภาพดินที่เป็นกรดแคดเมียมมีสภาพเคลื่อนที่ดีกว่าสังกะสี แคดเมียมเคลื่อนที่ได้ในดินที่มีค่า พีเอช ระหว่าง 4.5 - 5.5 ขณะที่ในดินที่เป็นด่างแคดเมียมไม่ค่อยเคลื่อนที่ ซึ่งในสภาพดินเป็นกรดสภาพละลายได้ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน นอกจากนั้นการเปลี่ยนแปลงศักย์รีดอกซ์และพีเอชในดินมีผลต่อการละลายได้ และการแพร่กระจายของแคดเมียมเป็นอย่างมาก และแคดเมียมมีในรูปสารประกอบได้เช่นเดียวกับกลุ่มแคตไอออนคือ Zn^{+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+}

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 $CdCO_3$ หรืออาจอยู่ร่วมกับฟอสเฟตได้เช่นเดียวกัน

แคดเมียมในดินจะเปลี่ยนจากรูปสารประกอบอินทรีย์ไปอยู่ในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนได้มากขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงศักย์รีดอกซ์และพีเอชในดินมีผลต่อการละลายได้ และการแพร่กระจายของแคดเมียมเป็นอย่างมาก (เกศินี พุกลานนท์, 2547)

คาร์บอนที่มีผลต่อการกระจายตัวของสังกะสี กล่าวคือเมื่อดินอยู่ในสภาพน้ำขังในดินจะมีคาร์บอนต่ำ มีผลให้สังกะสีกระจายตัวได้น้อยกว่าเมื่ออยู่ในสภาพน้ำกึ่งขัง และทำให้สังกะสีในดินเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อข้าวลดน้อยลง นอกจากนี้ยังทำให้แคดเมียมอยู่ในรูป CdS ทำให้ข้าวดูดดึงแคดเมียมไปสะสมในข้าวได้น้อย แต่เมื่อระบายน้ำออกเพื่อเก็บเกี่ยวแคดเมียมจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแคดเมียมไอออนทำให้รากข้าวสามารถดูดดึงแคดเมียมได้ และนำไปสะสมยังเมล็ดเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปริมาณแคดเมียมสะสมในเมล็ดข้าวจึงไม่ควรที่จะระบายน้ำออกจากนาก่อนที่จะเก็บเกี่ยวข้าวแต่ควรที่จะเก็บเกี่ยวข้าวที่อยู่ในสภาพน้ำขัง

อนงนาฏ ศรีประโชติ (2549) ได้ศึกษาการกระจายตัวของแคดเมียมในดินที่มีการปนเปื้อนในพื้นที่บ้านพะเต๊ะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ผลการศึกษาพบว่าในพื้นที่ลุ่มและพื้นที่ดอนที่มีน้ำขังแคดเมียมอยู่ในรูปที่ดูดยึดด้วยคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 60 ของผลรวมส่วนประกอบทาง

เคมีทั้งหมด และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมทั้งหมดกับปริมาณสังกะสีทั้งหมด พบว่าเมื่อปริมาณสังกะสีในดินมากขึ้น ปริมาณการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินก็จะมีมากขึ้น สอดคล้องกับ Adriano (2001) ซึ่งได้กล่าวไว้ว่า ในธรรมชาติแคดเมียมในดินจะพบอยู่ร่วมกับแร่สังกะสี โดยมีอัตราส่วนของแคดเมียมต่อสังกะสีเท่ากับ 1:100 ถึง 1:1,000 ดังนั้นเมื่อปริมาณสังกะสีในดินเพิ่มขึ้น ปริมาณแคดเมียมก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

2.1.7 ปริมาณแคดเมียมในดินและพืช

ปริมาณแคดเมียมในดินทั่วไปมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.07 - 1.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัมโดยมีค่าเฉลี่ยสูงในดินฮิสโตซอลล์และค่าเฉลี่ยโดยรวมของดินทั่วไปมีค่า 0.53 มิลลิกรัม/กิโลกรัมสำหรับดินที่มีการปนเปื้อน แหล่งปนเปื้อนที่สำคัญ คือ การถลุงแร่ กากตะกอนน้ำโสโครก ปริมาณแคดเมียมในพืชทั่วไปมีค่าต่ำ จะมีค่าสูงในพืชบางชนิด เช่น ผักกาดหอม 0.66 mg/kg หรือในใบผักโขม (spinach) ในปริมาณ 0.11 mg/kg(น้ำหนักสด) เพื่อกินใบ หรือพืชหัวบางชนิด จึงเป็นตัวนำแคดเมียมสู่มนุษย์ เมื่อมีการปนเปื้อน แคดเมียมจะสะสมในรากมากที่สุด โดยสะสมในใบรองลงมา และมีการเคลื่อนย้ายสู่เมล็ดได้น้อย (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2538) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพืชผัก คือ ผักคะน้า ผักกาดขาว และกวางตุ้ง ตามลำดับ พบว่าทั้งผักกาดขาวและผักกวางตุ้งสะสมแคดเมียมไว้ในต้นและรากมากที่สุด (บุปผา แซ่มประเสริฐ, 2527) ถ้าปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือดินของพืชอยู่ในช่วง 5-700 มิลลิกรัม/กิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้งแล้ว อาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชได้ (Chaney, 1982) และไปมีผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของพืช ยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสง กระบวนการคายน้ำของพืช รวมทั้งลดปริมาณคลอโรฟิลล์ ทำให้โครงสร้างของคลอโรฟิลล์ผิดปกติได้ (Peligard, 1986) ปริมาณแคดเมียมที่พบในพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ส่วนของพืชถึงแม้จะมีแคดเมียมในพืชสูงก็ตาม พืชปราศจากอาการเป็นพิษจากแคดเมียม ซึ่งนับเป็นอันตรายอย่างมากเพราะพืชเป็นอาหารด่านแรกในห่วงโซ่อาหารของคนและสัตว์ที่กินพืช (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) ซึ่งจากการศึกษาปริมาณแคดเมียมในผักบุงจิ้นพบว่าแคดเมียมถูกสะสมไว้ในราก ผักบุงจิ้นเป็นส่วนใหญ่ การเจริญเติบโตของใบและลำต้นถูกยับยั้งเนื่องจากพิษของแคดเมียมรุนแรงกว่าส่วนราก ทั้งๆที่สะสมได้น้อยกว่าส่วนราก แสดงว่าใบและลำต้นไวต่อพิษของแคดเมียมมากกว่าราก (วิไลภรณ์ บุญญกิจจินดา, 2523) อาการที่เป็นพิษที่แสดงในพืชมากขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของพืช Tlustos et al. (1998) พบว่าการสะสมและกระจายตัวของสารหนูและแคดเมียมในพืช 5 ชนิด ได้แก่ ข้าวโอ๊ต ผักโขม กะหล่ำปลี แครอท และถั่วเขียว มีการสะสมสารหนูในส่วนราก และมีการสะสมแคดเมียมในส่วนใบ

2.1.8 ความสัมพันธ์ของแคดเมียมและพืช

แคดเมียมสามารถละลายได้ดีในดิน ดังนั้นแม้แคดเมียมมีเพียงปริมาณเล็กน้อยปนเปื้อนในดินจะถูกดูดและสะสมในพืชซึ่งโดยสภาพความเข้มข้นปกติ พืชจะมีแคดเมียมในมวลแห้งน้อยกว่า 1 mg/kg ถึงแม้จะมีแคดเมียมในพืชสูงมากพืชก็จะปราศจากอาการเป็นพิษจากแคดเมียม ซึ่งนับว่าเป็นอันตรายอย่างมากเนื่องจากพืชเป็นผู้ผลิตในห่วงโซ่อาหาร ในดินทั่วไปมีแคดเมียมอยู่ 0.5 mg/kg องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (US-EPA) กำหนดปริมาณแคดเมียมที่สามารถบริโภคได้ 30 ไมโครกรัมต่อวัน (เกศินี พุกลานนท์, 2547)

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

Surabhukdi (2006) ได้ศึกษาผลของแคดเมียมและสังกะสีต่อการเจริญเติบโตของเบญจมาศ ดาวเรือง และบานไม่รู้โรย โดยผลการศึกษาพบว่าเบญจมาศที่ปลูกในดินที่ผสม $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ที่ความเข้มข้น 20, 40, 60 80 และ 100 mg/kg แสดงอาการแคระแกร็นและมีช่วงข้อที่สั้น และเริ่มแสดงอาการใบซีดเหลืองเล็กน้อยที่ระดับความเข้มข้น 100 mg/kg

2.1.9 ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในดิน

ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในดินที่ยอมรับได้ (maximum permitted concentration) คือ ค่ากำหนดมาตรฐานความปลอดภัยของโลหะหนักที่อนุญาตให้มีปริมาณสูงสุด ทั้งในดินและวัตถุที่ใช้เพื่อปรับปรุงดินในการเกษตรรวมทั้งปริมาณสะสมหรือตกค้างที่พบในดิน หลังการใช้วัตถุดังกล่าว ในบางประเทศที่พัฒนาแล้วหลายประเทศ เช่น สมาชิกสหภาพยุโรป เยอรมัน ออสเตรเลีย อังกฤษ แคนาดา สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่น มีค่ากำหนดระดับมาตรฐานของโลหะหนักในดินของแต่ละประเทศแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2

พิชิต พงษ์สกุล และ สุรสิทธิ์ อรรถจารุสิทธิ์ (2542) ได้ทำการประเมินและกำหนดระดับเกณฑ์พื้นฐาน (background levels หรือ ระดับตรวจสอบ (investigation levels) ของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทย ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่นำมาใช้การประเมินการปนเปื้อนระยะแรก บ่งชี้ถึงอันตรายที่เกิดในระดับความเข้มข้นที่ทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดมลพิษในสภาพแวดล้อมและเป็นอันตรายต่อมนุษย์ โดยสำรวจและเก็บตัวอย่างดินชั้นบนในพื้นที่ทำการเกษตรและแปลงทดลองปุ๋ยระยะยาวในทุกภาคของประเทศไทย จำนวน 318 ตัวอย่าง กำหนดโดยค่าความเข้มข้นที่ 95 เปอร์เซนต์ไทล์ เป็นระดับเกณฑ์พื้นฐานความเข้มข้นของสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว ในดินของประเทศไทย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 70, 0.15 และ mg/kg ตามลำดับ

ตารางที่ 2 มาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของธาตุโลหะหนักในดินที่ยอมรับได้

(ปรีดา พากเพียร และคณะ, 2541 และ ทศนีย์ อัดตะนันท์, 2543)

ประเทศ	มาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของธาตุโลหะหนักในดินที่ยอมรับได้ (mg/kg)		
	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
ไทย	-	37	400

2.1.10 มาตรฐานของแคดเมียมในอาหารและพืช

การกำหนดค่ามาตรฐานสูงสุดของโลหะหนักที่ยอมรับได้ โดยสารพิษชนิดต่างๆ ในพืชที่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ได้กำหนดในรูปของปริมาณสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Residue Level; MRL) ในอาหารและพืช ดังรายละเอียดที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณแคดเมียมที่ยอมรับได้ (Maximum Residue Level; MRL) ในอาหาร

ชนิดของโลหะหนัก	ประเภท	ปริมาณที่ยอมรับได้ (mg/kg)		
		ประเทศจีน ^a	Codex	สหภาพยุโรป
แคดเมียม	ข้าวสาร	0.20	0.4	0.20
	พืชใบ เซอลารี และเห็ดบรีโภาคได้	0.20	0.20	0.20
	พืชเมล็ดอื่นๆ ข้าวโพด ข้าวฟ่าง มันฝรั่ง	0.10	0.10	0.10
	พืชต้น	0.10	0.10	0.05
	ผักชนิดอื่นๆ ผลไม้	0.05	0.05	0.05
	เนื้อสัตว์	0.20	0.10	0.05
	ปลา	0.10	n.a.	0.05
	น้ำแร่ธรรมชาติ	n.a.	0.003	n.a.

ที่มา : ^a สถาบันอาหาร, 2549

n.a. หมายถึง ไม่มีการรายงาน

2.1.11 มาตรฐานของแคดเมียมในดิน

ในการกำหนดค่ามาตรฐานปริมาณโลหะหนักในดิน จะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็นหลัก โดยเรียกว่า Soil Guideline Value (SGV) หรือค่ามาตรฐานคุณภาพดิน ตามประกาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 พ.ศ. 2547 ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน ได้ให้ความหมายมาตรฐานคุณภาพดินไว้คือ “มาตรฐานการปนเปื้อนของสารอันตรายที่ยอมให้มีได้ในดิน โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายหรือผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนที่สัมผัสผิวดินทั้งทางตรงและทางอ้อม” โดยกำหนดปริมาณแคดเมียมและสารประกอบแคดเมียม (cadmium and compounds) ในมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมต้องไม่เกิน 37 mg/kg และแบ่งตามมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่น ต้องไม่เกิน 810 mg/kg (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2547) ซึ่งการกำหนดปริมาณค่าโลหะหนักในแต่ละประเทศอาจแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ของเกณฑ์ที่กำหนดของแต่ละประเทศ (ตารางที่ 4) โดยมาตรฐานคุณภาพดิน หรือ SGV เป็นค่าที่คำนวณจากหลักการด้านความเสี่ยงต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ในการได้รับโลหะหนัก และการป้องกันความเสี่ยงจากการเคลื่อนที่ของสารพิษเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารด้วย

ตารางที่ 4 มาตรฐานโลหะหนักของคุณภาพดิน (Soil Guideline Value) เพื่อทำการเพาะปลูก

โลหะหนัก	มาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเพาะปลูก (มิลลิกรัม/กิโลกรัมน้ำหนักแห้ง)		
	ประเทศไทย	ประเทศอังกฤษ	ประเทศแคนาดา
สารหนู	3.9	20	14
โครเมียม	300	130	67
แคดเมียม	37	1 (พีเอช6) 2 (พีเอช7) 3 (พีเอช8)	1
ปรอท	23	3	0.16
ตะกั่ว	400	450	55
นิกเกิล	1,600	50	43
ซิลิเนียม	390	35	1.4

ที่มา : ศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย, 2550

2.2 สังกะสี

สังกะสีเป็นโลหะที่มีการผลิตและนำเข้ามาใช้ประโยชน์เมื่อประมาณ 600 ปีมาแล้ว โดยช่วงแรกจะมีการใช้มากในแถบประเทศอินเดียและจีน โดยมีการผลิตเครื่องที่ทำจากโลหะสังกะสีผสม และนำสังกะสีออกไซด์มาผสมถ่านหินเพื่อใช้ทำเครื่องปั้นดินเผา สำหรับกระบวนการผลิตโลหะสังกะสีที่เป็นต้นแบบของเทคโนโลยีในปัจจุบันถูกคิดค้นในปี ค.ศ.1738 โดยวิลเลียม แชมเปียน ทำให้มีการใช้สังกะสีอย่างแพร่หลายและถือเป็นโลหะที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดเป็นอันดับสี่ในปัจจุบันรองจากเหล็ก อะลูมิเนียม และทองแดง (กิตติพันธ์ บางยี่ขัน, 2551)

2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสังกะสี

สังกะสีเป็นธาตุลำดับที่ 25 เป็นธาตุแรกของหมู่ II B จัดเป็นธาตุโลหะ สังกะสีในรูปของแร่บริสุทธิ์ เป็นโลหะสีน้ำเงินขาว มันวาว มีน้ำหนักโมเลกุล 65.37 ความถ่วงจำเพาะ 7.14 มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 419 องศาเซลเซียส และมีจุดเดือด 907 องศาเซลเซียส สารประกอบของสังกะสีถูกใช้ในอุตสาหกรรม โลหะสังกะสีถูกนำมาผสมกับโลหะอื่นๆ เช่น ทองเหลืองและทองแดง (Irwan et al, 1997)

2.2.2 แหล่งที่มาของสังกะสี

สังกะสีสามารถพบได้มากมายในธรรมชาติ โดยมีปริมาณอยู่ 0.0005% และ 0.02% บนผิวโลก สังกะสีพบได้ทั่วไปในอากาศ ดิน น้ำ และพบในอาหาร แร่สังกะสีสำคัญที่นำมาใช้ในการถลุงโลหะสังกะสี ได้แก่ สังกะสีซัลไฟด์ (ZnS) หรือ Sphalerite ซึ่งเป็นแร่ที่พบในหลายประเทศ เช่น อเมริกา เม็กซิโก เปรู โบลิเวีย แคนาดา และออสเตรเลีย นอกจากนี้ยังมีแร่สังกะสีในรูปอื่นๆ เช่น สังกะสีคาร์บอเนต ($ZnCO_3$) หรือ Smithsonite สังกะสีออกไซด์ (ZnO) หรือ Zincite และแร่สังกะสีซิลิเกต (Zn_2SiO_4) ที่เรียกว่า Wellemite โดยแหล่งแร่สังกะสีที่สำคัญอื่นๆ ได้แก่ จีน อินเดีย พม่า เวียดนาม ไอร์แลนด์ รัสเซีย และคาซัคสถาน เป็นต้น สำหรับแหล่งแร่สังกะสีของประเทศไทยที่ใหญ่ที่สุด คือ เหมืองแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งมีแร่สังกะสีซิลิเกตที่มีความเข้มข้นประมาณ 50% แต่บางครั้งก็พบปะปนอยู่กับ หินปูน และมีความเข้มข้นไม่สูงมากนัก (ความเข้มข้น 2-12%) (กิตติพันธ์ บางยี่ขัน, 2551)

2.2.3 การใช้ประโยชน์จากสังกะสี

1) เคลือบผิวเหล็กป้องกันการเกิดสนิมและผุกร่อน โดยสังกะสีจะทำหน้าที่ป้องกัน 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกจะทำหน้าที่ป้องกันผิวเหล็กไม่ให้สัมผัสกับอากาศหรือสารอย่างอื่น และหากเกิดการขีดข่วนหรือผุกร่อนจนถึงผิวเหล็กแล้ว สังกะสีจะทำหน้าที่ในขั้นต่อไป รูปของ galvanic action คือ โลหะสังกะสีซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical activity) สูงกว่าเหล็ก จะทำตัวเป็นขั้วบวกและดึงออกซิเจนมาทำปฏิกิริยา เกิดเป็นสนิมแทนเหล็ก ทำให้ผิวเหล็กไม่ผุกร่อนแม้

ผิวเหล็กจะสัมผัสกับอากาศ การใช้งานด้านนี้มีสัดส่วนมากที่สุดโดยคิดเป็นร้อยละประมาณ 45-50 ของการบริโภคสังกะสีทั้งหมด

2) ใช้ทำทองเหลืองโดยสัมผัสกับโลหะทองแดง และอาจมีโลหะอื่น ๆ ผสมเพิ่ม คุณสมบัติเป็นการเฉพาะต่อการใช้งาน เช่น ตะกั่ว อะลูมิเนียม ดีบุก พลวง และแมงกานีส เป็นต้น

3) สังกะสีออกไซด์ใช้ในงานอุตสาหกรรมยาง เซรามิก ยา สีสะท้อนแสง สังกะสีซัลเฟต ใช้ในการผลิตสารทำใยสังเคราะห์เรยอน และสังกะสีคลอไรด์ใช้ทำยาดับกลิ่นปาก ยาฆ่าเชื้อ และยารักษาเนื้อไม้ไม่ให้ผุและติดไฟง่าย

4) สังกะสีฝุ่น (zinc dust) ใช้ในการผลิตสารเคมีที่ใช้ในการพิมพ์และย้อมผ้า ใช้ผสมอะลูมิเนียมผงเพื่อแก่น้ำกระด้าง ใช้เป็นสารผลิตก๊าซในคอนกรีตทำให้ได้รูปทรง ใช้เป็นสารเร่งในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ช่วยในการคายไฮโดรเจนในการทำสบู่จากซีดีฟิงพาราฟิน นอกจากนี้ยังใช้ทำดอกไม้ไฟ ผงไฟแฟลช อุตสาหกรรมน้ำตาลและกระดาษ

5) ใช้ทำโลหะผสมสำหรับงานหล่อ (die casting) เนื่องจากมีจุลลอมเหลวต่ำ จึงให้คุณสมบัติที่ดีคือ ง่ายต่อการขึ้นรูป นอกจากนี้ยังคงทน กิ่งไส ตกแต่งง่าย และมีสีสนสวยงาม โลหะผสมที่สำคัญได้แก่ อะลูมิเนียม แมกนีเซียม และทองแดง เป็นต้น สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ทำด้วยโลหะสังกะสีผสมมีมากมาย เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ ลูกบิดประตู ของเล่นเด็ก เครื่องใช้ในครัวเรือน เครื่องทอกล อุปกรณ์สำนักงาน และท่อน้ำ เป็นต้น

2.2.4 ปฏิกริยาของสังกะสีในดิน

สังกะสีเป็นธาตุที่เคลื่อนที่ได้ดีในช่วงที่มีการผุพังสลายตัวของวัตถุต้นกำเนิดสารประกอบที่ละลายได้ของสังกะสี สามารถตกตะกอนได้ทันทีกับคาร์บอเนต หรืออาจถูกดูดซับ (Adsorbed) โดยแร่และสารประกอบอินทรีย์ โดยเฉพาะที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ แร่สังกะสีที่สำคัญและพบทั่วไป คือ sphalerite (Zn,Fe-ZnS), wurxite (β -ZnS), zincite (ZnO), smithsonite (ZnCO₃) willermite (ZnSiO₄) และ hemimorphite (Zn₄Si₂O₇(OH)₂·H₂O) แร่เหล่านี้มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบประมาณ 50% ทั่วโลกผลิตสังกะสีจากแร่สำคัญ คือ sphalerite, wurzite และ smithsonite โดยทั่วไปแร่สังกะสีจะมีจุลธาตุอื่นๆปะปนอยู่หลายตัว เช่น Pb, Cu, Ag และ Cd เป็นธาตุที่พบร่วมกับสังกะสีมากที่สุด

รูปของสังกะสีที่พบได้มากที่สุดในดินคือรูป Zn²⁺ สังกะสีในรูปอื่นอาจปรากฏให้เห็นได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

รูปแคตไอออน : Zn²⁺, ZnCl⁺, AnOH⁺, AnHCO₃⁺

รูปแอนไอออน : ZnO_2^- , ZnO_2^{2-} , Zn(OH)_3^-

สารประกอบ : Zn(OH)_2 , ZnO , $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Zn}_5(\text{OH})_6(\text{CO}_3)_2$, ZnCO_3

ปัจจัยสำคัญที่ควบคุมสภาพการเคลื่อนที่ได้ของสังกะสีนั้นคล้ายคลึงกับของทองแดงเป็นอย่างมาก แต่สังกะสีอยู่ในสภาพละลายได้ในปริมาณที่มากกว่าทองแดง

2.2.5 ปริมาณของสังกะสีในดินและพืช

สังกะสีเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อเมตาบอลิซึมของพืชและเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์หลายชนิด พืชแต่ละชนิดแต่ละสายพันธุ์จะมีความไวต่อสังกะสีที่ได้รับต่างกัน รวมทั้งความอ่อนแอ (susceptibility) ต่อการขาดสังกะสีก็แตกต่างกัน การขาดสังกะสีในพืชเป็นสิ่งที่พบได้ทั่วไป แต่การวินิจฉัยทำได้ยาก วิธีที่ดีที่สุดคือ การดูจากอาการพืช การวิเคราะห์พืชและดิน นอกจากนี้การพิจารณาสัดส่วนระหว่าง Fe กับ Zn ก็ถือว่าเป็นสิ่งที่สำคัญ เนื่องจากจะทำให้การวินิจฉัยแม่นยำขึ้น เพราะการขาดสังกะสีบางครั้งจะไม่แสดงอาการ (Hidden Zn Deficiency) ในข้าวโพดสัดส่วนระหว่าง Fe:Zn ควรเท่ากับ 6 (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2559)

2.2.6 โทษของสังกะสี

สังกะสีเป็นธาตุที่พบอยู่ในอาหาร การได้รับสังกะสีน้อยเกินไปก็เป็นสาเหตุของปัญหาสุขภาพได้ แต่การได้รับสังกะสีในปริมาณที่มากเกินไปก็เป็นอันตราย การบริโภคสังกะสีในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้มีอาการปวดท้องอย่างกะทันหัน มีอาการคลื่นเหียนและอาเจียน เมื่อได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน จะเป็นสาเหตุให้เกิดภาวะโลหิตจาง และลดปริมาณของไขมันดีในร่างกาย และพบว่าในหนูที่ได้รับอาหารที่มีสังกะสีในปริมาณมากจะทำให้เป็นหมันได้ แต่ยังไม่ทราบแน่ชัดว่าสังกะสีมีผลต่อการสืบพันธุ์ของมนุษย์หรือไม่ (Agency for Toxic Substances and Disease Registry ATSRD, 2005)

ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำมีความเป็นพิษอย่างยิ่งต่อสาหร่ายหลายๆชนิด รวมทั้งสัตว์จำพวกกุ้งและปลา ความเข้มข้นของสังกะสีที่มากมีผลกระทบต่อสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังชนิดเล็ก เช่น Molluscs, crustaceans, odonates และ Phemeropterans ในสภาพแวดล้อมของแหล่งน้ำ สังกะสีที่ละลายอยู่ในน้ำโดยตรงจะเป็นพิษมากกว่าสังกะสีที่อยู่ในห่วงโซ่อาหาร ส่วนสัตว์เลือดอุ่นพบว่า การได้รับสังกะสีมากเกินไปส่งผลให้เกิดภาวะขาดแคลนทองแดง มีผลต่อกระบวนการ metabolism ของเหล็ก และทำปฏิกิริยาทางเคมีกับตะกั่วและยาอีกด้วย (Irwan et al., 1997)

2.2.7 การปนเปื้อนสังกะสีในสิ่งแวดล้อม

สังกะสีบางส่วนถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมตามกระบวนการธรรมชาติ แต่ส่วนมากพบว่าเกิดมาจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ การทำเหมืองแร่ การผลิตเหล็กกล้า การเผาถ่านและของเสีย สังกะสีพบอยู่ในดิน ตะกอน และฝุ่นในอากาศ ฝนและหิมะเป็นตัวที่นำพาสังกะสีที่มีอยู่ในอากาศลงมาสู่ดิน สารประกอบสังกะสีบางชนิดสามารถเคลื่อนย้ายลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินไปสะสมในทะเลสาบ ลำธาร และแม่น้ำ สังกะสีที่อยู่ในดินส่วนใหญ่จะยังคงจับกับอนุภาคดิน และไม่ละลายน้ำ (ATSDR, 2005)

พื้นที่ดินที่ทำการเกษตร เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสังกะสี แต่จากการรายงานของ Huang and Jin (2008) อ้างถึงใน ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (2559) พบว่า การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสังกะสีในดินที่ใช้แตกต่างกันมีความแตกต่างกันน้อยมาก การพบปริมาณสังกะสีสูงในดินเป็นการบ่งชี้ถึงวัตถุต้นกำเนิดดิน กระบวนการสร้างดิน รวมถึงอินทรีย์วัตถุที่ได้มาแตกต่างกันแต่แรกเริ่มกำเนิดดิน โดอนุภาคดินเหนียวที่มีแร่เวอร์มิคูไลต์ กิปไซต์สูง มักพบสังกะสีในปริมาณสูง การปนเปื้อนสังกะสีจากการกระทำของมนุษย์เริ่มจากอุตสาหกรรมโลหะที่มีใช้แร่เหล็ก (nonferrous metal) จนมาถึงกิจกรรมจากภาคการเกษตร

ปัญหาหนึ่งในการปนเปื้อนสังกะสี คือ การเปลี่ยนรูปของสังกะสี เช่น เมื่อใส่กากตะกอนน้ำเสียจะทำให้สังกะสีเปลี่ยนมาอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น Voegelin และคณะ (2008) อ้างถึงใน ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (2559) รายงานว่า รูปทางเคมีของสังกะสีจะถูกควบคุมโดยพีเอชและความเข้มข้นของสังกะสี ในดินกรดจะพบสังกะสีส่วนใหญ่ที่เคลื่อนย้ายได้ง่าย (สกัดด้วย HN_4NO_3) ในขณะที่ดินที่มีสภาพกรด-ด่างเป็นกลางจะพบอยู่ในรูปที่มีโอกาสเคลื่อนย้าย (Mobilization สกัดด้วย $\text{NH}_4\text{-acetate}$) (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2559)

2.3 ดิน (Soil)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.1 ชนิดและส่วนประกอบของดิน

ดิน หมายถึง วัตถุทางธรรมชาติที่ปกคลุมผิวโลก เกิดจากการแปลงสภาพหรือสลายตัวของหิน แร่ธาตุ และอินทรีย์วัตถุผสมคลุกเคล้ากันตามธรรมชาติรวมตัวกันเป็นชั้นบาง ๆ เมื่อมีน้ำและอากาศที่เหมาะสมจะทำให้พืชเจริญเติบโตและยังชีพอยู่ได้ (สุริลา ตุลยะเสถียร และคณะ, 2544)

ชนิดของดินสามารถจำแนกตามลักษณะของเนื้อดินออกเป็น 3 ประเภท ดังต่อไปนี้

1) ดินเหนียว คือ ดินที่มีเนื้อละเอียดที่สุด ยืดหยุ่นเมื่อเปียกน้ำ เหนียวติดมือ ปั้นเป็นก้อนหรือคลึงเป็นเส้นยาวได้ พังทลายได้ยาก อุ่มน้ำได้ดี จับยึดและแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชได้ค่อนข้างสูงจึงมีธาตุอาหารอยู่มากเหมาะที่จะใช้ปลูกข้าวนาดำเพราะเก็บน้ำได้นาน

2) ดินทราย คือ ดินที่เกาะตัวกันไม่แน่น ระบายน้ำและอากาศได้ดีมาก อุ้มน้ำได้น้อย พังทลายง่าย มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำเพราะความสามารถในการจับยึดธาตุอาหารมีน้อย พืชที่ขึ้นอยู่ในบริเวณดินทรายจึงขาดน้ำและธาตุอาหารได้ง่าย

3) ดินร่วน คือ ดินที่มีเนื้อค่อนข้างละเอียด นุ่มมือ ยึดหยุ่นพอสมควร ระบายน้ำได้ดีปานกลาง มีแร่ธาตุอาหารพืชมากกว่าดินทราย เหมาะสำหรับใช้ในการเพาะปลูก ซึ่งไม่ค่อยพบในธรรมชาติ แต่จะพบเนื้อดินที่มีลักษณะใกล้เคียงเป็นส่วนมาก

ส่วนประกอบของดินสามารถจำแนกได้เป็น 4 ส่วน (รูปที่ 1) คือ

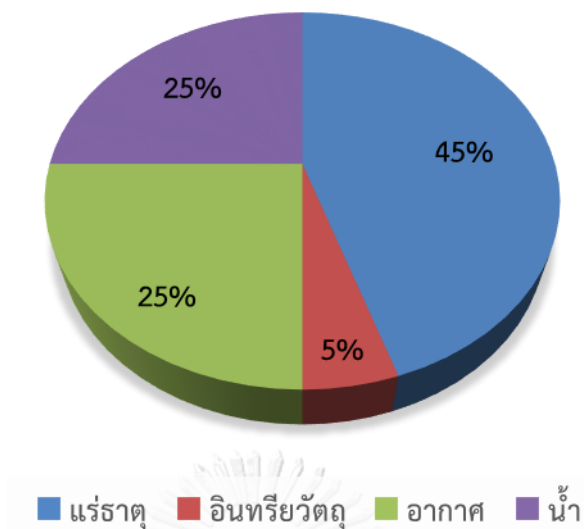
1) อนินทรีย์วัตถุหรือแร่ธาตุ เป็นส่วนที่สลายตัวมาจากวัตถุให้กำเนิดดิน เช่น หินหรือแร่ โดยทั่วไปจะพบในดินในสัดส่วนประมาณครึ่งหนึ่งของเนื้อดินทั้งหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแต่ละพื้นที่ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

2) อินทรีย์วัตถุ เป็นส่วนที่มีหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดของธาตุอาหารของพืชที่เกิดจากการเน่าเปื่อยของซากพืชและสัตว์ที่ทับถมกันอยู่บนดินโดยจุลินทรีย์ อินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายแล้วและอยู่ในสภาพที่เหมาะสมเรียกว่า ฮิวมัส (humus) อินทรีย์วัตถุเป็นส่วนประกอบที่บอกถึงความอุดมสมบูรณ์ของดิน เพราะนอกจากเป็นสารอาหารของพืชแล้ว ยังทำให้เกิดสภาพกรดอ่อนที่เหมาะสมต่อการละลายของแร่ธาตุในดินที่เป็นธาตุอาหารสำหรับพืชอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีสมบัติในการรักษาความชื้นไว้ในดิน

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

4) อากาศ ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน และออกซิเจน ซึ่งจะแทรกอยู่ตามช่องว่างในดินระหว่างอนุภาคดิน ก๊าซแต่ละชนิดมีความสำคัญต่างกันไป ดังนี้คือ ออกซิเจนเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในการหายใจของพืชและจุลินทรีย์ ก๊าซไนโตรเจนในอากาศจะถูกเปลี่ยนเป็นเกลือไนเตรตซึ่งเป็นธาตุอาหารพืชโดยแบคทีเรียที่สามารถตรึงไนโตรเจน (Nitrogen fixing bacteria) เช่น แบคทีเรียในสกุล Rhizobium ที่อาศัยอยู่ในปมรากพืชตระกูลถั่ว เป็นต้น

สัดส่วนดินที่ถือว่ามีส่วนประกอบที่เหมาะสมแก่การเพาะปลูกพืช โดยทั่วไปมักจะมีส่วนประกอบ ประกอบด้วยอนินทรีย์ (แร่ธาตุ) อินทรีย์วัตถุ อากาศ และ น้ำ ร้อยละ 45, 5, 25 และ 25 ตามลำดับ (สุริลา ตูลยะเสถียร และคณะ, 2544; คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของดิน

2.3.2 คอลลอยด์ในดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ดินที่อยู่ในสารละลายประกอบด้วยแร่ธาตุต่าง ๆ อินทรีย์วัตถุที่มีขนาดเล็กมาก 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 และส่วนที่ปลดปล่อยออกมานี้อาจตกผลึก หรือทำปฏิกิริยารวมตัวกันใหม่ เป็นผลึกบาง ๆ มีขนาดเล็กมาก เรียกว่า แร่ดินเหนียว (clay mineral) แร่ดินเหนียวแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม และซิลิเกตเคลย์ หรืออะลูมิโนซิลิเกต

2.3.3 สมบัติของดิน

2.3.3.1 สมบัติทางกายภาพ (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2538)

1) พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area)

เนื้อดินสามารถบอกลึถึงปริมาณคอลลอยด์อนินทรีย์อย่างหายขาด ทั้งนี้เพราะอนุภาคดินเหนียวมีขนาดเล็กมากอีกทั้งอยู่ในสภาพคอลลอยด์ จึงทำให้มีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักเป็นปริมาณมาก ดินที่มีลักษณะเป็นเนื้อละเอียดจะมีพื้นที่ผิวสูงขึ้น การเพิ่มพื้นที่ผิวให้สูงขึ้น

ในดินเนื้อหยาบก็สามารถทำได้ โดยการเติมคอลลอยด์อินทรีย์ลงไป ซึ่งได้แก่ ฮิวมัส การเพิ่มขึ้นอินทรีย์วัตถุให้แก่ดิน เมื่อสลายตัวก็จะให้ฮิวมัสแก่ดิน

2) ความพรุนของดิน (soil porosity)

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

3) การดูดซับ (adsorption) และการดูดซึม (absorption)

การดูดซึมที่สำคัญในดินคือ การดูดซึมน้ำ น้ำจะถูกดินดูดไว้ในช่องระหว่างอนุภาคดินช่องในดินไม่อาจดูดซึมน้ำไว้ได้ทั้งหมด ทั้งนี้เพราะแรงดูดซึมต้องเอาชนะอิทธิพลแรงดึงดูดของโลกให้ได้ แรงดูดซึมนี้มีความสัมพันธ์โดยแปรผกผันกับขนาดของช่อง ยิ่งช่องมีขนาดเล็กแรงดูดซึมนิ่งยิ่งมาก ดังนั้นปริมาณน้ำที่ดูดซึมไว้จึงมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคของดิน ดินที่มีอนุภาคดินเหนียวในปริมาณมาก (เนื้อดินละเอียด) จะดูดซึมน้ำได้มาก ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่สูงก็จะอุ้มน้ำไว้ได้มาก

4) อินทรีย์วัตถุในดิน (คมสรร ศิริติกุล, 2547)

4.1) อิทธิพลของอินทรีย์วัตถุที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของดินที่เห็นได้ชัดคือสีของดิน ดินที่มีอินทรีย์วัตถุอยู่ในปริมาณสูงจะมีสีเข้ม อาจจะมีสีน้ำตาลไปจนถึงสีดำ ยกเว้นในกรณีที่ดินมีปริมาณแมงกานีสอยู่สูงมากก็อาจทำให้ดินมีสีดำได้เหมือนกัน การจับตัวกันเป็นก้อนของอนุภาคดิน ต้องอาศัยอินทรีย์วัตถุเข้ามามีส่วนช่วยอย่างมาก โดยเฉพาะดินที่มีลักษณะเป็นทราย ทั้งนี้อินทรีย์วัตถุจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างอนุภาคของดินให้จับตัวกันเป็นเม็ดดิน ในทำนองเดียวกันดินเหนียวที่อนุภาคดินจับตัวกันแน่นทึบ อินทรีย์วัตถุก็จะช่วยให้ดินจับตัวกันเป็นก้อนแยกออกจากกันได้บ้าง ทำให้ดินร่วนขึ้น ดังนั้นอินทรีย์วัตถุจึงมีส่วนช่วยทำให้ดินมีสมบัติทางกายภาพเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช ไม่ว่าจะดินจะมีลักษณะเป็นทรายหรือมีสภาพเป็นดินเหนียวก็ตาม

นอกจากนี้อินทรีย์วัตถุช่วยให้ดินเหนียวมีการระบายน้ำดีขึ้น เนื่องจากอินทรีย์วัตถุช่วยทำให้ดินเหนียวจับตัวกันเป็นก้อนได้ดี จึงทำให้มีช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่างก้อนดิน

เพิ่มขึ้น เมื่อมีน้ำอยู่ในดินปริมาณที่เกินกว่าความสามารถของดินจะดูดซับไว้ได้แล้ว มันจะไหลลงไปสู่ดินชั้นล่าง หรือระเหยไปจากดินโดยผ่านทางช่องว่างระหว่างอนุภาคของดินได้ง่าย ในทางตรงข้าม อินทรีย์วัตถุก็ยังช่วยให้ดินทรายหรือดินที่มีเนื้อหยาบอุ้มน้ำได้ดีขึ้น เพราะสมบัติทางกายภาพของอินทรีย์วัตถุมีลักษณะมีช่องว่างมาก และมีความพรุนสูง จึงดูดซับน้ำไว้ได้ดี

4.2) อินทรีย์วัตถุมีอิทธิพลต่อสมบัติทางเคมีของดินโดยทางตรงและทางอ้อมสำหรับอิทธิพลโดยทางตรงก็คือ อินทรีย์วัตถุเป็นอินทรีย์สารชนิดหนึ่ง ขณะที่สลายตัวในดินได้ปลดปล่อยกรดอินทรีย์ออกมาหลายชนิด ซึ่งก็เป็นจำพวกกรดอ่อนเสียส่วนมาก จนกระทั่งเหลือส่วนที่มีความเสถียรมากที่สุด ที่เรียกกันว่า ฮิวมัส (humus) ด้วยเหตุนี้อินทรีย์วัตถุจึงช่วยให้ดินมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลง พีเอช ได้เป็นอย่างดี อิทธิพลของอินทรีย์วัตถุที่มีต่อสมบัติทางเคมีที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้สูงกว่าสารคอลลอยด์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนโดยเฉพาะสารฮิวมัส ย่อมจะมีประจุลบและประจุบวกอยู่มากมายจึงสามารถแลกเปลี่ยนประจุตรงข้ามได้มาก ส่วนอิทธิพลของอินทรีย์วัตถุที่มีต่อดินโดยทางอ้อม เป็นแหล่งให้ธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช โดยเฉพาะธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน อันเป็นองค์ประกอบสำคัญของสารอินทรีย์ส่วนมาก นอกจากนี้ยังมีธาตุคาร์บอนซึ่งเป็นแหล่งพลังงานอันสำคัญของจุลินทรีย์ในดิน

4.3) อิทธิพลของอินทรีย์วัตถุที่มีต่อชีวภาพของดิน จุลินทรีย์ในดินหลายชนิดโดยเฉพาะพวก Heterotrophic ซึ่งอาศัยพลังงานและธาตุคาร์บอนจากอินทรีย์วัตถุโดยตรง มีอยู่ส่วนน้อยที่อาศัยพลังงานจากกระบวนการ Oxidation ของส่วนที่เป็นแร่ธาตุต่างๆในดิน นอกจากนี้อินทรีย์วัตถุยังเป็นแหล่งให้ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์แก่จุลินทรีย์ในดินที่สูงตามไปด้วย เพราะมีแหล่งอาหารและพลังงานในปริมาณที่เพียงพอ

4.4) อิทธิพลของอินทรีย์วัตถุที่มีต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช และธาตุอาหารพืชหลายชนิดที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของอินทรีย์วัตถุในดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งธาตุไนโตรเจน เนื่องจากธาตุไนโตรเจนไม่พบว่าเป็นองค์ประกอบอยู่ในแร่ปฐมภูมิชนิดใดเลย แต่บางส่วนของแร่ที่ถูกตรึงไว้กับแร่ดินเหนียวในรูป NH_4^+ อยู่บ้าง ซึ่งก็ถือว่าเป็นจำนวนน้อยไนโตรเจนส่วนใหญ่จะอยู่ในดินในรูปของสารอินทรีย์ เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว ปริมาณของอินทรีย์วัตถุอย่างเดียวน่าจะมีมากกว่า ธาตุไนโตรเจน ประมาณ 20 เท่า หรือ อาจกล่าวได้ว่า อัตราส่วนของปริมาณอินทรีย์วัตถุต่อปริมาณไนโตรเจนในดินเท่ากับ 20:1

อินทรีย์วัตถุมีความสำคัญต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินเกี่ยวกับธาตุอาหารพืชชนิดอื่นๆ ที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่สำคัญก็คือ ฟอสฟอรัสและกำมะถัน นอกจากนี้ยังมี K^+ Ca^{2+} และ Mg^{2+} อีกด้วย นอกเหนือจากอิทธิพลของอินทรีย์วัตถุที่มีต่อปริมาณธาตุอาหารในดิน

โดยตรงแล้วยังมีอิทธิพลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ และความสามารถในการต้านทาน การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดความเป็นด่าง และความเป็นเกลือในดินได้เช่นเดียวกัน

4.5) อิทธิพลของดินอินทรีย์วัตถุที่มีต่อกษัยการของดินอินทรีย์วัตถุในดิน ช่วยทำให้โครงสร้างของดินดีขึ้นและทำให้โครงสร้างมีความคงทน ถ้าอยู่บริเวณหน้าดินจะป้องกัน ผิวหน้าของดินไม่ให้จับตัวกันเป็นแผ่น และป้องกันไม่ให้จับตัวกันแน่นทึบ ทำให้การซึมซาบของน้ำลง ไปในดินเพิ่มมากขึ้น เป็นการลดการไหลบ่าของน้ำไปตามผิวดิน จึงลดกษัยการของดินได้ในที่สุด ด้วย เหตุนี้ดินที่มีอินทรีย์วัตถุในปริมาณสูง ย่อมเกิดกษัยการของดินได้น้อยลง

5) สภาพความชื้นดินและการเคลื่อนย้ายของน้ำ (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา , 2538)

ความแตกต่างในด้านความสามารถอุ้มน้ำของดินเป็นผลมาจากความแตกต่างของเนื้อดิน ดังนั้นเนื้อดินจึงเป็นปัจจัยควบคุมระดับการชะละลาย (leaching) ของดินและการแทรกซึม (infiltration) ลงของน้ำจากบนดินเข้าสู่ผิวดิน ในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นอัตราการแทรกซึมลงของน้ำ และความสามารถอุ้มน้ำของดินที่สภาพความจุที่ความชื้นปกติ ในประเภทเนื้อดินต่าง ๆ ซึ่งทั้งอัตราการแทรกซึมลงของน้ำและความสามารถอุ้มน้ำของดินสามารถปรับปรุงได้โดยการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน และการปรับปรุงโครงสร้างดินจึงเป็นการลดอัตราการแทรกซึมลง และเป็นการลดความจุในการอุ้มน้ำของดิน

ตารางที่ 5 อัตราการแทรกซึมลงและความสามารถในการอุ้มน้ำของดินที่ระดับความจุความชื้นปกติ

เนื้อดิน	การแทรกซึมลง (นิ้ว/ชม.)		ปริมาณน้ำทั้งหมด (นิ้ว/ฟุตของความลึก)
	ดินพีชปกคลุม	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

ที่มา : ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (2538)

2.3.3.2 สมบัติทางเคมี (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2538)

1) ความเป็นกรด-ต่างของดิน (พีเอช)

การวัดค่าความเป็นกรด-ต่างของดินคล้ายคลึงกับการวัดค่าความเป็นกรด-ต่างของน้ำ คือ การวัดพีเอชของดิน แต่แตกต่างกันที่ดินนั้นมีความเป็นกรดอยู่ 2 ชนิดคือ กรดจริงและกรดแฝง พีชแต่ละชนิดจะมีค่าพีเอชในดินที่เหมาะสมแตกต่างกัน (ตารางที่ 6)

ดินมีทั้งประจุบวกและลบ แต่มีค่าประจุลบมากกว่า การที่มีประจุนี้นับว่าเป็นประโยชน์มาก เพราะธาตุต่าง ๆ ในสารละลายดินรวมทั้งธาตุอาหารของพืชในรูปที่พืชดูดกินได้จะต้องอยู่ในรูปประจุเช่นกัน ธาตุอาหารพืชโดยส่วนใหญ่มีประจุเป็นบวก ดังนั้นจึงถูกดินดูดซับไว้ไม่ไหลตามน้ำลงไปจนเลยระดับความลึกของราก ทำให้ธาตุอาหารที่ถูกดินดูดซับเอาไว้เนี่ยย่อมมีโอกาสให้พืชดึงดูดเอาไปใช้ได้

ไฮโดรเจนไอออนนั้นมีประจุบวก ดังนั้นส่วนของไฮโดรเจนที่ถูกดินดูดซับจึงเรียกว่า สภาพกรดแฝง (potential acidity) ส่วนของกรดที่มีบทบาทต่อความสามารถในการละลายได้ของธาตุและความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชนี้ คือ ส่วนสภาพกรดจริง ดังนั้นดินเหนียวและดินทรายที่มีค่าพีเอชเท่ากัน จะมีความต้องการปุ๋ยในการยกระดับพีเอชไม่เท่ากันได้ เพราะดินทั้งสองชนิดมีค่ากรดแฝงไม่เท่ากัน เนื่องจากดินเหนียวมีค่าประจุลบมากกว่าจึงมีสภาพกรดแฝงมากกว่า ส่วนของไฮโดรเจนที่ถูกดูดซับจะมีปริมาณมากกว่าส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และจะปลดปล่อยจากส่วนที่ถูกดูดซับออกมาเป็นบางส่วน ลักษณะคล้ายการแตกตัวของกรดอ่อน

ตารางที่ 6 ค่าพีเอช (pH) ของดินที่เหมาะสมกับพืชบางชนิด

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

ที่มา : ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (2538)

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

การที่ดินมีประจุไฟฟ้าเป็นผลเนื่องมาจากอนุภาคของดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุในดิน โดยส่วนใหญ่อนุภาคของดินเหนียวมีรูปร่างแบนบางทำให้มีโอกาสที่อะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่รอบนอกจะหลุดออกไปได้มากขึ้น เมื่อสารประกอบใดเกิดมีการสูญหายของอะตอมก็จะมีประจุทันที ประจุที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นประจุลบ ดินมีความสามารถในการดึงดูดแคตไอออนไว้ไม่เท่ากัน แคตไอออนที่ถูกดูดซับ (adsorbed cation) กับคอลลอยด์ดินจะสามารถเปลี่ยนแปลงกันได้กับแคตไอออนในสารละลายดิน จึงมีชื่อเรียกว่า แคตไอออนแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable cation) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก หมายถึงผลรวมของประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดของดิน มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมสมมูลต่อดินแห้ง 100 กรัม

ค่าซีอีซีของดินในภาคต่าง ๆ ของประเทศไทย (ตารางที่ 7) พบว่าดินในภาคใต้ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคตะวันออกของประเทศไทย ดินส่วนใหญ่เป็นดินเหนียว จะมีค่า ซีอีซี ต่ำกว่า 5 มิลลิอิกควาเลนต์ ต่อดิน 100 กรัม ส่วนในภาคกลางและภาคเหนือดินส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นดินเหนียวละเอียดกว่าจึงมีค่าซี อี ซี สูงกว่า 10 มิลลิอิกควาเลนต์ ต่อดิน 100 กรัม โดยเฉพาะดินในภาคกลาง 50 เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างดินมีค่า ซีอีซี สูงกว่า 10 มิลลิอิกควาเลนต์ ต่อดิน 100 กรัม ทั้งนี้เพราะดินในภาคกลางส่วนใหญ่เป็นดินเหนียว

ตารางที่ 7 ค่าซีอีซีของดินในภาคต่างๆของประเทศไทย

ภาค	จำนวนตัวอย่างทั้งหมด	จำนวนตัวอย่างดินแจกแจงตามค่าซีอีซี (มิลลิอิกควาเลนต์ 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	-

ที่มา : นงคราญ กาญจนประเสริฐ และคณะ, 2546

ประโยชน์ทางการเกษตร ธาตุอาหารพืชส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ แคลต์ไอออน จึงสามารถถูกดินยึดไว้ที่ผิวเคลย์ไมเซลล์ของพืชสามารถนำเอาแคลต์ไอออนเหล่านี้มาใช้ในการเจริญเติบโตได้ในการใส่ปุ๋ยโปแตสเซียมลงไปดิน โปแตสเซียมไอออนจะไปไล่ที่ไฮโดรเจนไอออน และแคลเซียมไอออนที่เกาะยึดที่ผิวเคลย์ไมเซลล์ทำให้ดินมีโปแตสเซียมไอออนเกาะยึดกับเคลย์ไมเซลล์ ทำให้ดินไม่ขาดธาตุโปแตสเซียมไอออนแม้ว่าจะมีการชะล้างที่เกิดจากน้ำในการทำดินให้ร่วนซุยเหมาะสำหรับการเพาะปลูกโดยใช้ความรู้จากการแลกเปลี่ยนแคลต์ไอออน ตัวอย่างเช่น ถ้าดินของเรามีปริมาณโซเดียมในดินปริมาณมาก ทำให้เกิดดินเหนียว น้ำซึมผ่านได้ยาก ไถพรวนลำบาก เมื่อแห้งดินจะแข็งแตรกระแจะไม่เหมาะต่อการเพาะปลูก ถ้าเราเติมแคลเซียมไอออนลงไปดิน

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

2.4 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (adsorption) เป็นการดึงดูดระหว่างผิวหน้าของของแข็งหรือของเหลวที่เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) กับโมเลกุลสารตั้งต้นที่เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) บนตำแหน่งกัมมันต์ (active site) ขณะที่การคาย (desorption) คือการแตกออกของพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับทำให้ได้ตำแหน่งกัมมันต์กลับคืนมา

2.4.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับจะเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวหน้าของตัวดูดซับโดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

(1) การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) ที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับบนผิวหน้าของตัวดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งเป็นการดูดซับที่อ่อนและไม่ มีพันธะเคมีเกิดขึ้น ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิปกติ และจะเกิดได้ดียิ่งขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิปกติ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นทั้งบนผิวหน้าของตัวดูดซับ โดยตรงและบนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ จึงเกิดการซ้อนทับของ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับอย่างไม่จำกัด ที่เรียกว่าการดูดซับหลายชั้น (multilayer adsorption)

(2) การดูดซับทางเคมี (chemisorption) เป็นการเกิดพันธะเคมีหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวหน้าของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับที่แข็งแรง เช่น แรงโควาเลนต์ (covalent bond) และไอออนิก (ionic bond) ทำให้การดูดซับประเภทนี้จะเกิดขึ้นได้ดี

หรือเกิดขึ้นเร็วที่อุณหภูมิสูง และเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น นั่นคือการดูดซับทางเคมีจะไม่เกิดบนชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ ทำให้การดูดซับเกิดเพียงชั้นเดียวเท่านั้นที่เรียกว่า การดูดซับชั้นเดียว (monolayer adsorption) ดังนั้น การดูดซับประเภทนี้จึงมีความเฉพาะเจาะจงสูง โดยขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับและชนิดของผิวตัวดูดซับเท่านั้น

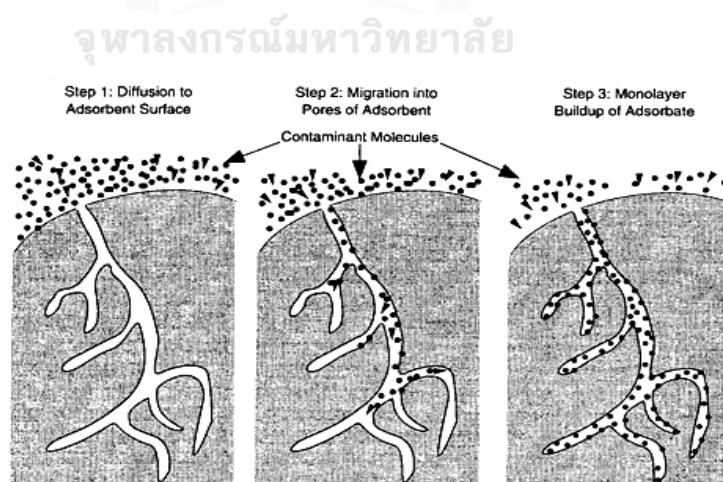
นอกจากนี้การดูดซับทางกายภาพและทางเคมีสามารถเกิดพร้อมกันได้ โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นเหนือการดูดซับชั้นแรกขึ้นไปจะถือว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับอาจเกิดการดูดซับทางกายภาพบนผิวของตัวดูดซับก่อนแล้วค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งการเกิดการดูดซับทางกายภาพนั้นสามารถเกิดขึ้นได้บนชั้นของการดูดซับทางเคมี (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

การดูดซับหรือการเกาะประกอบด้วย 3 กลไกคือ กลไกทางไฟฟ้าสถิต กลไกทางเคมี และกลไกทางกายภาพ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน (รูปที่ 2) ดังนี้

(1) การแพร่ภายนอก (external diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึง/ไปเกาะบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับ

(2) การแพร่ภายใน (internal diffusion หรือ pore diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าไปในพื้นที่ผิวรูพรุนของตัวดูดซับ

(3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะติดที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการเกาะติดด้วยแรงทางกายภาพหรือทางเคมี หรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน และเป็นการกระบวนการที่รวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่



รูปที่ 2 กลไกการดูดซับ (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

2.4.2 สมดุลของการดูดซับ

การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยตัวถูกดูดซับจะถูกดึงดูดไว้บนผิวของตัวดูดซับ ในขณะที่เดียวกันจะเกิดการคายร่วมด้วย จนกระทั่งอัตราการดูดซับและการคายเท่ากัน ณ สภาวะที่ควบคุมไว้ ดังนั้นการดูดซับของตัวถูกดูดซับดังกล่าวจึงเข้าสู่สมดุล (equilibrium) นั่นคือความเข้มข้นของตัวที่ถูกดูดซับ ณ สภาวะที่ควบคุมไว้ เท่ากับความเข้มข้นในตัวดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ที่กำหนดไว้สามารถใช้ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm) เป็นการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น

ไอโซเทิร์มของการดูดซับ คือความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความเข้มข้นของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุลเมื่ออุณหภูมิคงที่ จากนั้นนำไปเขียนกราฟลอการิทึม โดยแกน x เป็นความเข้มข้นหรือความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) ส่วนแกน y เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อตัวดูดซับ เส้นกราฟที่เกิดขึ้นแสดงถึงไอโซเทิร์มของการดูดซับ ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับของสิ่งปนเปื้อนในสารละลาย โดยทั่วไปไอโซเทิร์มของการดูดซับมักขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ในปี ค.ศ.1945 Brunauer (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552) ได้จำแนกเป็น 5 ชนิด และเพิ่งค้นพบใหม่ในไอโซเทิร์มชนิดที่ 6 ดังแสดงในภาพที่ 3

1) ชนิดที่ 1 เรียกว่าไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ตามสมการของแลงเมียร์ ไอโซเทิร์มแบบนี้มักพบในวัสดุที่มีความพรุนแต่ผิวหน้ามีพื้นผิวภายนอกต่ำ เช่น ซีโอไลต์ ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในตอนต้นและเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ค่าการดูดซับคงที่ กรณีเช่นนี้ปริมาตรของรูพรุนจะมีค่ามากกว่าปริมาตรที่ทำให้เกิดการดูดซับชั้นเดียวมาก การดูดซับนี้จะพบได้ในการดูดซับที่ย้อนกลับได้

2) ชนิดที่ 2 เรียกว่าไอโซเทิร์มรูปตัวเอส (S-shaped isotherm หรือ Sigmoid) มักเกิดกับวัสดุที่ไม่มีความพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่หรือมาโครพอร์ส (macroporous) เช่น อลูมินา ซิลิกา เป็นต้น ตำแหน่ง B ซึ่งเป็นคล้ายหัวเข่าเป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกคลุมแบบชั้นเดียวแล้ว หลังจากนั้นจึงเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น ดังนั้นปริมาณการดูดซับที่จุด B สามารถนำไปใช้การคำนวณพื้นที่ผิวได้ ซึ่งการดูดซับแบบนี้ย้อนกลับได้

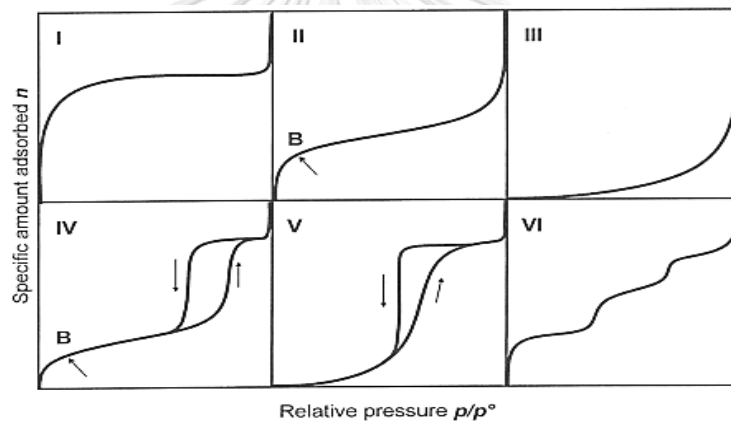
3) ชนิดที่ 3 มีรูปร่างเหมือนกระจกแก้วและไม่มีตำแหน่งที่เหมือนหัวเข่า ไอโซเทิร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบบ่อย จะเกิดกับการดูดซับที่อ่อนเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าต่ำ เช่น การดูดซับของสารที่มีขั้วบนวัสดุที่ไม่มีขั้ว หลังจากผิวหน้าถูกคลุมหมดแล้ว การดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วแสดงถึงการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกันเองมีสูง เช่น การดูดซับของไอน้ำบนแกรไฟต์

4) ชนิดที่ 4 มักจะพบในวัสดุที่มีรูพรุนแบบมีโซพอร์ส (mesoporous) คือมีขนาดรูพรุนระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร การดูดซับในช่วงแรกจะมีค่า P/P_0 ต่ำจะเหมือนกับไอโซเทิร์มชนิดที่ 2 แต่หลังจากนั้นค่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อค่า P/P_0 มาก เกิดจากการควบแน่นในรูขนาดเล็กแบบ capillary ทำให้เกิด hysteresis loop ที่เกิดจากเส้นกราฟของการดูด

ซับและการคายไม่ทับกัน เพราะการคายเกิดได้ยากกว่าเนื่องจากต้องเอาชนะแรง capillary ขนาดของการเกิดการควบแน่นในรูขนาดเล็กสามารถนำมาคำนวณการกระจายของขนาดรูพรุน (pore-size distribution) ได้

5) ชนิดที่ 5 เหมือนกับชนิดที่ 4 แต่ต่างกันเพียงการควบแน่นในรูพรุน กรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อค่า P/P_0 สูงกว่า เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าต่ำ ส่วน hysteresis loop จากการดูดซับและการคายก็เกิดจากการเอาชนะแรง capillary ในการดึงตัวถูกดูดซับออกมา ไอโซเทิร์มชนิดนี้พบไม่บ่อยนัก เช่น ถ่านกัมมันต์กับน้ำ เป็นต้น

6) ชนิดที่ 6 เรียกว่าไอโซเทิร์มแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) พบไม่บ่อยนัก เกิดจากการดูดซับที่ละชั้นบนผิวหน้าที่มีหลายชั้นและความเป็นระเบียบสูง ความชันของกราฟจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ



รูปที่ 3 ไอโซเทิร์มของการดูดซับตามการจำแนกของ IUPAC (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

ไอโซเทิร์มของการดูดซับมีอยู่หลายชนิด เนื่องจากทฤษฎีที่ใช้อธิบายสมมูลของการดูดซับมีหลายทฤษฎี ซึ่งนิยมใช้มาก ได้แก่ ทฤษฎีแลงเมียร์และฟรุนดลิช

(1) ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) ใช้สำหรับการดูดซับทางเคมีบนผิวหน้าอุดมคติ เป็นไอโซเทิร์มที่ง่ายที่สุด ใช้กันมากสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว หลักการเกิดการดูดซับมาจากสมมติฐานต่อไปนี้

- การดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมีซึ่งแข็งแรงและเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer)
- สารหนึ่งตัวจะดูดซับบนหนึ่งตำแหน่งเท่านั้น

- พลังงานของการดูดซับแต่ละตำแหน่งมีพลังงานเท่า ๆ กันและไม่มีอันตรกิริยาระหว่างตำแหน่งและ/หรือระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็ นแรงผลักหรือแรงดึงดูด

- มีสมดุลเกิดขึ้นระหว่างการดูดซับและการคาย นั่นคือ อัตราเร็วของการดูดซับเท่ากับอัตราเร็วของการคายจากผิวหน้า

จากสมมติฐานดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการแลงเมียร์ ได้ดังนี้

$$X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e} \dots\dots\dots(2.1)$$

และเมื่อ X เข้าใกล้ X_m และ C_e เข้าใกล้ infinity (∞) จากสมการจะเขียนได้เป็น

$$\frac{C_e}{X} = \frac{1}{X_m b} + \frac{C_e}{X_m} \dots\dots\dots(2.2)$$

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

หรือ
$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{C_e} \times \frac{1}{X_m b} \dots\dots\dots(2.3)$$

โดยที่

X = ความสามารถในการดูดซับ ณ สมดุล (mg/g)

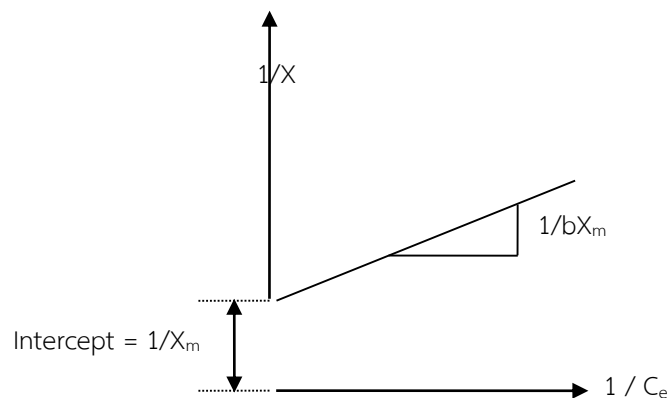
X_m = คือความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/g)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล (mg/L)

b = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (L/mg)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{X}$ เป็นแกนตั้งและ $\frac{1}{C_e}$ เป็นแกนนอน จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมีความชันเป็น $\frac{1}{X_m b}$ และจุดตัดแกนตั้งมีค่า $\frac{1}{X_m}$ ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 ไอโซเทอรั่มการดูดติดผิวแบบ Langmuir

ถ้า นำสมการที่ (2.2) มาเขียนกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ค่า b และ q_m สามารถหาได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน y (intercept) นอกจากนี้สมการแลงเมียร์ยังแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter, R_L) ดังสมการ

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) โดยค่า R_L จะแสดงถึงรูปร่างของไอโซเทอรั่มว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า $R_L > 1$ แสดงถึงการดูดซับไม่ดี (unfavorable), $R_L = 1$ แสดงถึงการดูดซับเป็นเส้นตรง (linear), $0 < R_L < 1$ แสดงถึงการดูดซับดี (favorable) และ $R_L = 0$ แสดงถึงการดูดซับเกิดผันกลับได้ (irreversible)

(2) ไอโซเทอรั่มแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) ใช้ทั้งการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ มักอธิบายการดูดซับของสารอินทรีย์และอนินทรีย์บนตัวดูดซับหลายประเภท เช่น ถ่านกัมมันต์ เรซินสังเคราะห์ เป็นต้น ไอโซเทอรั่มนี้ถูกพัฒนาจากไอโซเทอรั่มแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous) ซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียว โดยการดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (multilayer) จากการศึกษาโดยอาศัยสมมติฐานของทฤษฎีนี้ในแนวคิดของแบบจำลองหลายชั้น ทำให้ได้สมการดังนี้

$$\frac{x}{m} = K_F C_e^{1/n} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

โดยที่

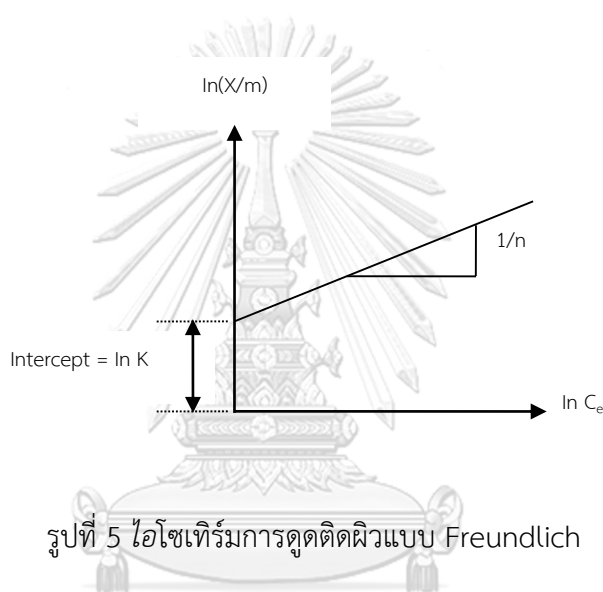
X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนัก (mg/g)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล (mg/L)

K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว (L/g)

$1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดติดผิว

จากสมการที่ (2.1) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(X/m)$ และ $\ln C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ไอโซเทิร์มการดูดติดผิวแบบ Freundlich

จากรูปที่ 5 ค่าความชันของกราฟเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\ln K$ สำหรับการดูดติดของสารอินทรีย์บนผิวของสารดูดติดส่วนใหญ่จะมีค่า $1/n$ ต่ำกว่า 1 กราฟที่มีค่าความชันสูง คือ มีค่า $1/n$ เข้าใกล้ 1 นี้จะพบว่า ความสามารถในการดูดติดที่ความเข้มข้นของสารละลายสูงๆ จะมีค่ามากและความสามารถนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของสารละลายนี้มีค่าต่ำลง และในกรณีที่กราฟมีค่าความชันน้อยๆ ค่า $1/n$ จะน้อยกว่า 1 มากๆ ก็จะพบว่าความสามารถในการดูดติดนี้จะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายให้ต่ำลง จากสมการของ Freundlich นี้ได้บ่งชี้ถึงความสามารถในการดูดติดของสารดูดติด หรือค่า (X/m) จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายในของเหลว ดังนั้นค่าความสามารถในการดูดติดจึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่สมดุลมีค่าสูงขึ้นด้วย

สมการของ Freundlich นี้ยังสามารถใช้ในการคำนวณหาปริมาณของสารดูดติดที่ต้องการใช้ในการลดค่าความเข้มข้นของสารละลายในของเหลว แทนค่า X ในสมการที่ 2.4 ด้วยค่า $(C_0 - C_e)$ โดยที่ค่า C_0 คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายในของเหลว จะได้ค่าดังสมการที่ 2.5

$$\log(C_0 - C_e) = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

เมื่อ K_F คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับหลายชั้น (mg/g) และ n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งตรงกับความสัมพันธ์ของสารละลาย ส่วนใหญ่ค่า K_F และ C_e จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากสมการที่ (2.5) นำไปเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ซึ่งค่า n และ K_F สามารถหาได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน y (intercept) โดยค่า $1/n$ อธิบายถึงไอโซเทิร์มของการดูดซับ ถ้า $1/n$ มากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมาก และถ้า $1/n$ น้อยกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดในการดูดซับ

สมการที่ 2.5 นี้มีประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้เปรียบเทียบค่าความสามารถในการกำจัดสารต่างๆ ของสารดูดซับที่ทั้งที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน

สุตารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์ (2551) ศึกษาการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมด้วยสารดูดซับจากกระดูกหมู การทดลองประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายตะกั่วและแคดเมียมแบบแบตช์ พบว่า ถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดตะกั่ว 10 mg/L ได้ 1,829 mg/g ถ่าน และสามารถกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 99 รองลงไปเป็นถ่านกัมมันต์และผงกระดูก สำหรับการกำจัดแคดเมียม ผงกระดูกให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด 383 mg/g กระดูก ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 10 mg/L สามารถกำจัดแคดเมียมได้ร้อยละ 85 รองลงไปเป็นถ่านกัมมันต์และถ่านกระดูก ไอโซเทิร์มการดูดซับตะกั่วของผงกระดูกเป็นแบบฟรอนดลิชถ่านกระดูกเป็นแบบแลงเมียร์ ไอโซเทิร์มการดูดซับแคดเมียมของผงกระดูกเป็นแบบแลงเมียร์

จักรพงษ์ แสนชัย (2548) ได้ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วยเกลือสังกะสี (ซิงค์คลอไรด์) ในการกำจัดสารตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าถ่านกระดูกที่คาร์บอนที่ 400 °C 1 ชั่วโมง และผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ มีคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น พื้นที่ผิว ขนาด และปริมาตรของโพรงแตกต่างจากถ่านกระดูกที่ไม่ผ่านการกระตุ้น ทั้งประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณสารตะกั่วเพิ่มขึ้นประมาณ 1 เท่า แต่ประสิทธิภาพการกำจัดสารแคดเมียมลดลงประมาณ 3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกระดูกที่ไม่ผ่านการกระตุ้น

ศุภกิจ พัฒนเตชะ (2545) ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกวัวกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานโดยการทดลองแบบแบตช์และแบบคอลัมน์ ผลการทดลองแบบแบตช์พบว่ากำจัดตะกั่วได้ดีที่สุดเมื่อเผากระดูกที่ 400 และ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่พีเอชเท่ากับ 4 มีประสิทธิภาพการดูดซับ 100% ที่ความเข้มข้นของตะกั่ว 10 mg/L สำหรับการกำจัดแคดเมียม ใช้อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถกำจัดได้ 100% ที่ความเข้มข้น 10 mg/L ที่พีเอช 6 และเมื่อความเข้มข้นเป็น 50 mg/L สามารถกำจัดแคดเมียมได้ร้อยละ 98.95 ที่พีเอช 6 ค่า

ไอโซเทิร์ม 68 mg/g ของกระดูก เวลาที่เหมาะสมคือ 48 ชั่วโมง เมื่อคาร์บอนไนซ์ที่ 400 °C ที่ความเข้มข้นแคดเมียม 10 mg/L พีเอช 5 สามารถกำจัดแคดเมียมได้ร้อยละ 100

อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ (2544) ศึกษาการใช้ถ่านกระดูกกำจัดตะกั่วแคดเมียม และโครเมียม โดยเผาที่อุณหภูมิ 600, 800 และ 1,000 °C นาน 8, 10 และ 12 ชั่วโมง โดยการทดลองแบบแบดซ์ แบบคอลัมน์ เพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกระดูก และหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะทั้ง 3 ชนิด ได้ผลสรุปว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมถ่านกระดูกคือ 600 °C โดยเวลาในการเผา ไม่นับสำคัญต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะ สามารถกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นสูงสุด 100 mg/L ที่พีเอชเป็น 5 สามารถกำจัดตะกั่วได้ 458.55 mg/g ถ่านกระดูก ส่วนแคดเมียมความเข้มข้นของสารละลาย 40 มิลลิกรัมที่พีเอชเป็น 6 สามารถกำจัดแคดเมียมได้ 29.80 mg/g ของถ่านกระดูก ไอโซเทิร์มการดูดซับตะกั่วเป็นแบบพรุนดลิส ส่วนไอโซเทิร์มการดูดซับของแคดเมียมเป็นแบบแลงเมียร์ การทดลองแบบคอลัมน์พบว่าประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมที่ความเข้มข้น 10 และ 5 mg/L ตามลำดับ

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว

1) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดติดผิวอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนของระบบต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดติดผิวจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดติดผิวดังนั้นการแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิวในทางตรงกันข้ามถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ความปั่นป่วนในถังดูดติดผิว คือความเร็วของน้ำที่ผ่านถึงต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีแล้วถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงขึ้นเนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว ความสามารถในการดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ สารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าสารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวน้อย ส่วนอัตราการดูดติดผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว เช่น คาร์บอนผง มีอัตราเร็วในการดูดติดสูงกว่าคาร์บอนแบบเกล็ด

3) ขนาดและลักษณะของสารดูดติดผิว ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยจะสามารถดูดติดผิวได้ดี นอกจากนี้ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสัมพันธ์กับการดูดติดผิวซึ่งถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุม

กลไกแล้ว ความสามารถในการดูดติดผิวจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดติดผิว นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง

4) พีเอช มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดติดผิวด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถจะเกาะติดผิวของสารดูดติดผิวได้ดี ในขณะที่สารละลายที่มีความเป็นด่างจะทำให้เกิดการตกตะกอนทางเคมีของตัวถูกดูดซับซึ่งจะทำให้ลดประสิทธิภาพของการดูดซับได้ (Kolodynska et al., 2012; Regmi et al., 2012)

5) อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็ว และขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคืออัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิและลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบ Exothermic

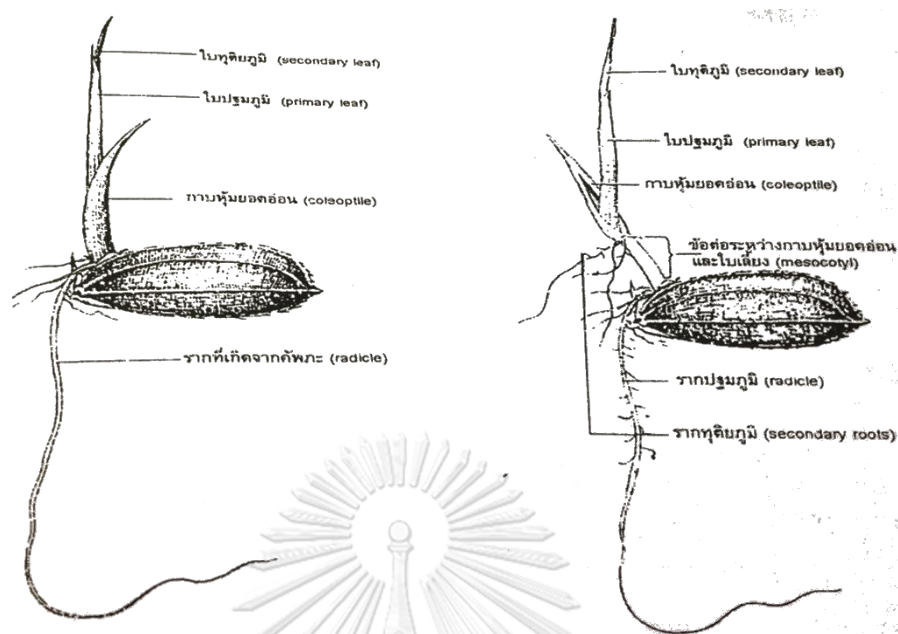
6) เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิวและอายุการใช้งานของถังดูดติดผิว โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดติดผิวเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้วก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวเลย

2.5 ข้าว (*Oryza sativa* L.)

2.5.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของข้าว

1) ราก

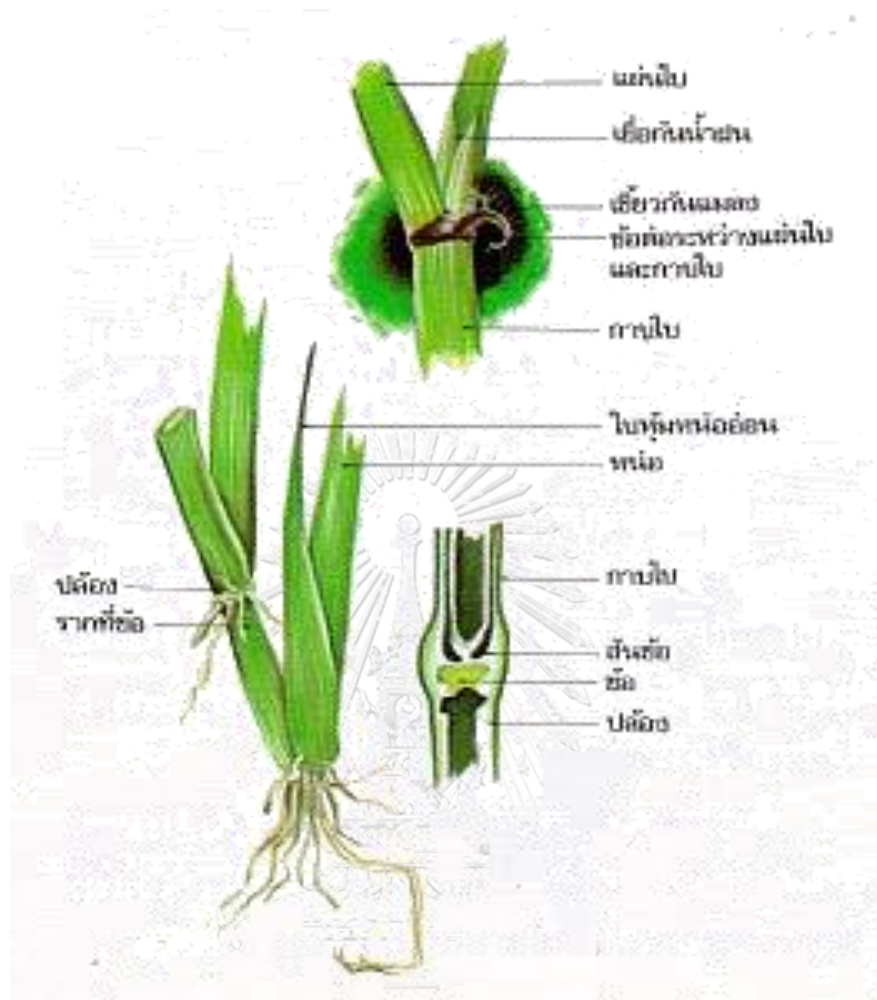
รากเป็นส่วนที่อยู่ใต้ผิวดิน ใช้ยึดลำต้นกับดินเพื่อไม่ให้ต้นล้ม แต่บางครั้งก็มีรากพิเศษเกิดขึ้นที่ข้อซึ่งอยู่เหนือพื้นดินด้วย ต้นข้าวไม่มีรากแก้ว แต่มีรากฝอย (fibrous root system) ประกอบด้วยรากที่พัฒนามาจากส่วนแรดิเคิล (radicle) เรียกว่า primary root หรือ first seedling root และรากที่แตกแขนงออกมาเรียกว่า secondary root หรือ lateral root รากที่เกิดจาก scutella node เรียกว่า seminal root ส่วนรากที่เกิดจากข้อใต้ดินตั้งแต่ coleoptilar node ขึ้นไป เรียกว่า adventitious (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 ลักษณะของรากข้าวขาวดอกมะลิ 105
ที่มา : กรมวิชาการเกษตร สถาบันวิจัยข้าว, 2544

2) ลำต้น

ลำต้น (haulm หรือ culm) มีลักษณะเป็นโพรงตรงกลางประกอบไปด้วย ข้อ (node) และปล้อง (internode) โดยมีข้อกั้นระหว่างปล้อง ความยาวของปล้องนั้นแตกต่างกัน จำนวนปล้องจะเท่ากับจำนวนใบของต้นข้าว ปกติมีประมาณ 20-25 ปล้อง ข้อประกอบด้วย วงเจริญ (growth ring) ปุ่มกำเนิดราก (root primordia) ตา (bud) และรอยกาบใบ (leaf scar) ข้าวมีการแตกหน่อ (tillering) ลำต้นหลักเรียกว่า main culm หน่อที่เจริญออกจาก main culm เรียกว่า primary tiller หน่อที่เจริญจากราก primary tiller เรียกว่า secondary tiller และหน่อที่เจริญจากราก secondary tiller เรียกว่า tertiary tiller ตามลำดับ



รูปที่ 7 ลักษณะของลำต้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105
ที่มา : กรมวิชาการเกษตร สถาบันวิจัยข้าว, 2544

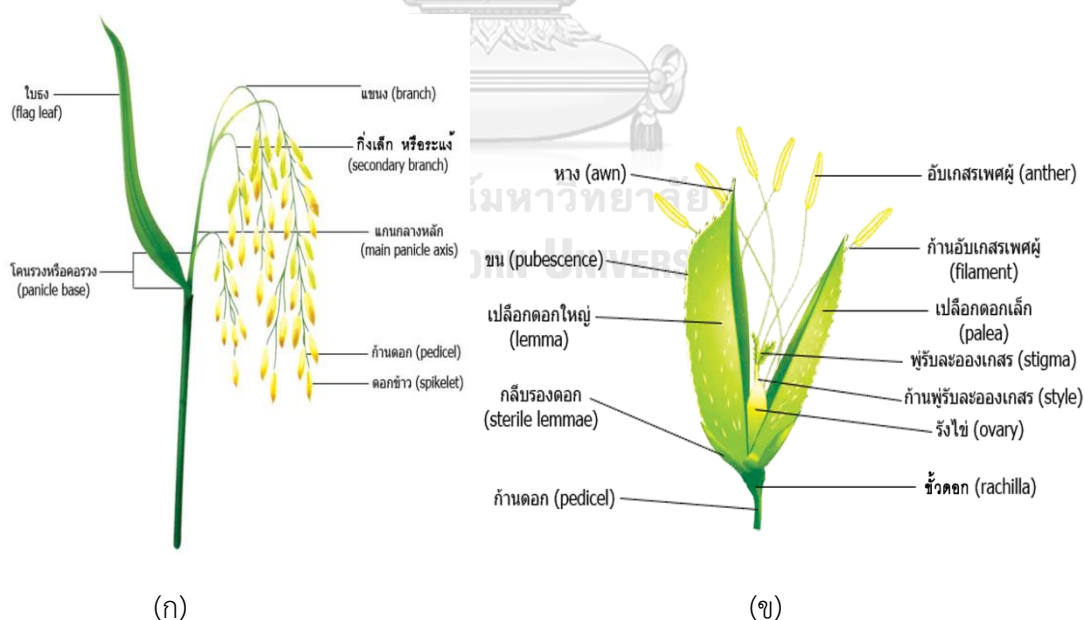
3) ใบ

ใบเป็นใบเดี่ยว (simple leaf) ประกอบด้วย กาบใบ (leaf sheath) และแผ่นใบ (leaf blade) บริเวณรอยต่อระหว่างกาบใบและแผ่นใบ (leaf collar) มีเยื่อพันน้ำหรือลิ้นใบ (ligule) หูใบหรือเขี้ยวใบ (auricle) ส่วนที่มีลักษณะคล้ายใบแต่ไม่มีเส้นกลางใบ เป็นสัน 2 สัน พบระหว่างหน่อหรือแขนงที่แตกจากลำต้นเรียกว่า prophyllum (รูปที่ 7) ต้นข้าวมีใบไว้สำหรับสังเคราะห์แสง เพื่อเปลี่ยนแร่ธาตุ อาหาร น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นแป้ง เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างเมล็ดของต้นข้าวต่อไป

4) ช่อดอกและดอก

ช่อดอกเป็นแบบ panicle ปล้องสุดท้ายของลำต้น (uppermost internode) เป็นก้านช่อดอก (peduncle) แกนกลางช่อดอกเรียกว่า rachis หรือ panicle axis กิ่งที่แตกจาก rachis เรียกว่า primary branch และกิ่งที่แตกจาก primary branch เรียกว่า secondary branch (รูปที่ 7) ดอกข้าวเกิดเป็นกลุ่มเรียกว่า spikelet ประกอบด้วย กลีบดอกที่หุ้ม spikelet 2 กลีบ ได้แก่ กลีบด้านนอก (outer glume) และกลีบด้านใน (inner glume) แต่มองเห็นไม่ชัด ดอกประกอบด้วยดอกย่อย (floret) 3 ดอก มีดอกย่อยเพียงดอกเดียวที่มีการเจริญ เรียกว่า flowering glume ส่วนดอกย่อยที่ไม่เจริญเหลือเฉพาะส่วน lemma เรียกว่า sterile lemma หรือ non-flowering glume หรือ empty glume

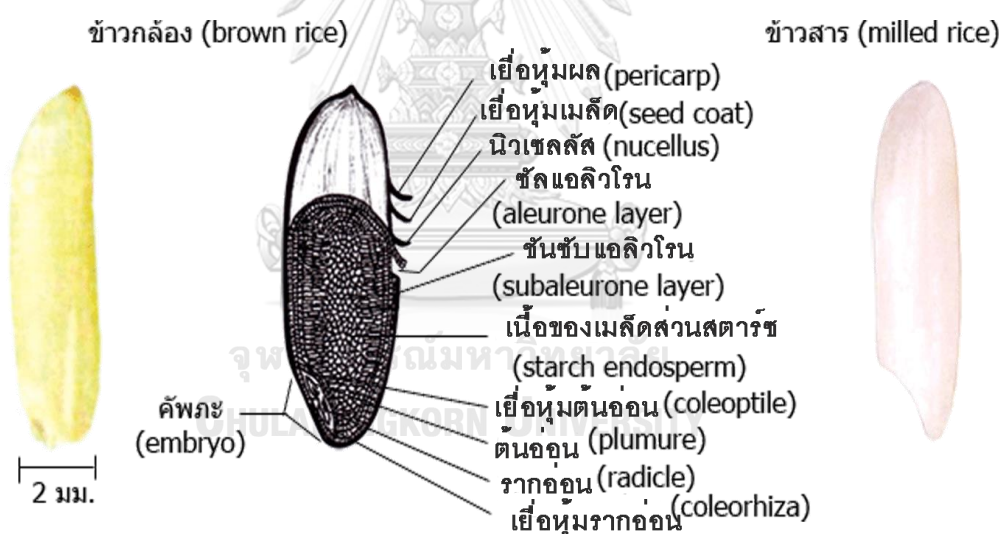
ดอกย่อยที่มีการเจริญประกอบด้วยกลีบดอกย่อยด้านนอก (lemma) ที่มีเส้นตามความยาว 5 เส้น และกลีบดอกย่อยด้านใน (palea) ที่มีเส้นความยาว 3 เส้น ดอกย่อยประกอบด้วย เกสรตัวผู้ (stamen) ที่มีก้านชูละอองเกสรตัวผู้ (filament) และอับละอองเกสรตัวผู้ (anther) ส่วนเกสรตัวเมีย (pistil) ประกอบด้วยรังไข่ (ovary) ก้านชูเกสรตัวเมีย (style) สั้น ปลายเกสรตัวเมีย (stigma) แยกเป็น 2 แฉก มีลักษณะคล้ายขนนก เรียกว่า plumose stigma และเยื่อรองรังไข่ (lodicule) อยู่ที่ส่วนฐานของรังไข่ (รูปที่ 8)



รูปที่ 8 ลักษณะของ (ก) ช่อดอก และ (ข) ดอก
ที่มา : กรมวิชาการเกษตร สถาบันวิจัยข้าว, 2544

5) ผล หรือเมล็ดข้าว

ผล หรือเมล็ดเป็นแบบ caryopsis ประกอบด้วยเยื่อหุ้มผล (pericarp) ติดอยู่กับส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat หรือ testa) มีเปลือกหุ้มซึ่งเป็นส่วนของ lemma และ palea เรียกว่า hull ผลของข้าวที่เก็บเกี่ยวมา เรียกว่า ข้าวเปลือก (hulled grain) เมื่อแกะส่วนของเปลือกหุ้มออกเห็นเยื่อหุ้มผล และเยื่อหุ้มผลที่มีสีน้ำตาลเรียกว่า ข้าวกล้อง (brown rice grain) เมื่อขัดส่วนของเยื่อหุ้มสีน้ำตาลออกจะเป็นข้าวสาร (kernel) ส่วนหัวของข้าวสารมีสีข้าวขุ่น เรียกว่า จมูกข้าวหรือคัพพะ (embryo) ที่เหลือเป็นเอ็นโดสเปิร์ม (endosperm) คัพพะประกอบด้วยแรดิเคิล (radicle) พลูมูล (plumule) ใบเลี้ยงที่ไม่มีการพัฒนา (epiblast) และเนื้อเยื่อที่กั้นระหว่างคัพพะกับเอ็นโดสเปิร์ม (scutellum) บริเวณรอบนอกของเอ็นโดสเปิร์มมีชั้น aleurone layer และส่วนสีข้าวขุ่นที่ด้านท้องของเมล็ดด้านเดียวกับคัพพะ เรียกว่า ท้องปลาหรือท้องไข (abdominal white) รูปที่ 9



รูปที่ 9 ลักษณะของเมล็ด

ที่มา : กรมวิชาการเกษตร สถาบันวิจัยข้าว, 2544

2.5.2 การเจริญเติบโตของข้าว (ไสว พงษ์เก่า และคณะ, 2525 และ จำรัส โปรงศิริ วัฒนา, 2534)

การศึกษาการเจริญเติบโต หรือสรีรวิทยาของพืชที่มีความสำคัญทำให้ทราบถึง ขั้นตอนของกระบวนการมีชีวิตของพืช และอิทธิพลของปัจจัยภายนอกที่ส่งผลต่อกระบวนการทำให้เกิดการผิดปกติหรือการเจริญเติบโตไม่เต็มที่ การศึกษาและเข้าใจถึงการตอบสนองของพืชทำให้สามารถนำความรู้นั้นไปปรับปรุงแก้ไขให้พืชเจริญเติบโตในสภาพปกติและให้ผลผลิตตามเป้าหมายได้ การเจริญเติบโตของข้าวโดยทั่วไปจะแบ่งเป็นระยะต่างๆ (ดังรูปที่ 10) ได้ดังนี้

1) การเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ (Vegetative growth) โดยมี 2 ระยะคือ

- ระยะต้นกล้า (seedling stage) เป็นระยะจากข้าวงอกจนกระทั่งข้าวแตกกอใช้ระยะเวลาประมาณ 20 วัน (ขึ้นอยู่กับพันธุ์) สิ้นสุดระยะนี้ต้นข้าวจะมีใบประมาณ 5-6 ใบ
- ระยะแตกกอ (tillering stage) นับจากวันที่ข้าวเริ่มแตกกอจนถึงข้าวเริ่มสร้างช่อดอกอ่อน (panicle initiation) ใช้เวลาประมาณ 30-50 วัน หลังจากระยะต้นกล้า ซึ่งระยะเวลาของระยะแตกกอนั้นขึ้นอยู่กับ การตอบสนองต่อช่วงแสงของพันธุ์ข้าว

2) การเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ (reproductive growth) เริ่มจากข้าวเริ่มสร้างช่อดอกอ่อน ผ่านระยะตั้งท้อง (booting stage) จนถึงโผล่ช่อดอกและผสมเกสร (heading, flowering, fertilization) โดยจะใช้ระยะเวลาช่วงนี้ประมาณ 30-35 วัน ลักษณะของระยะต่างๆมีดังนี้

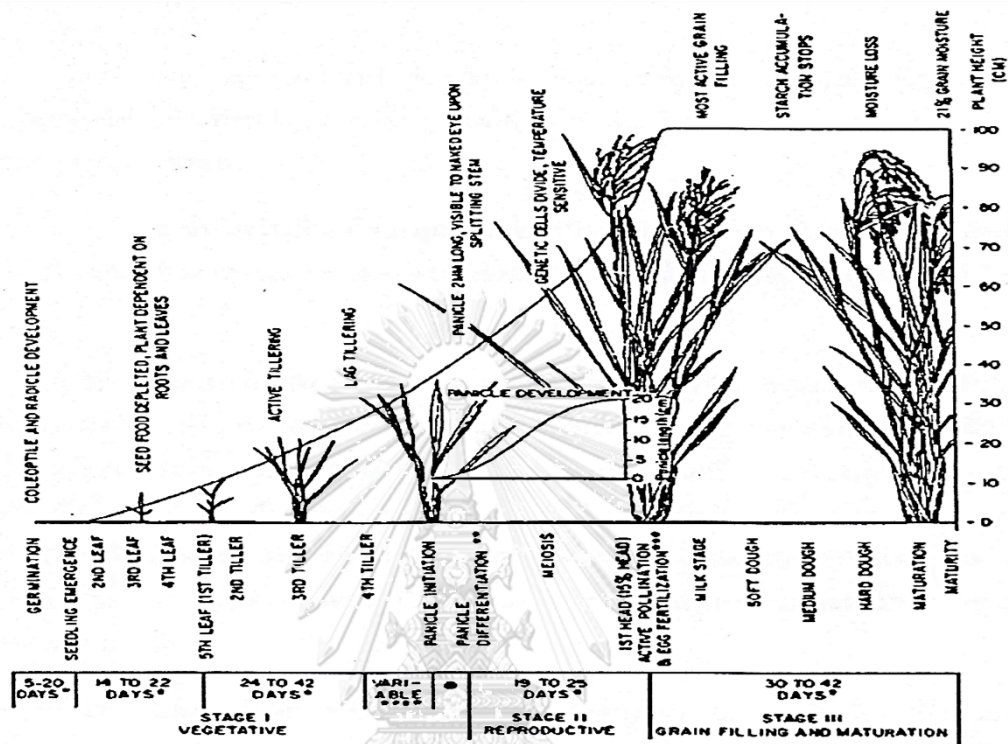
- ระยะเริ่มสร้างช่อดอกอ่อน หลังแตกกอเต็มที่แล้วก็จะเข้าสู่ระยะสร้างช่อดอกอ่อน (พันธุ์ที่ไวแสงจะต้องได้นับช่วงแสงที่เหมาะสมก่อนจึงจะก่อให้เกิดระยะนี้) ระยะนี้ต้นข้าวจะเปลี่ยนจากต้นที่มีลักษณะแบนเป็นต้นกลม และจะมีการยืดปล้อง (stem elongation) ในอัตรารวดเร็ว เมื่อผ่าลำต้นดูจะเห็นจุดกำเนิดช่อดอก (panicle primordium) ลักษณะเป็นสามเหลี่ยมมีสีขาวปุยๆ และจะเจริญเติบโตเรื่อยๆเป็นช่อที่มีดอก เรียกว่า spikelets

- ระยะตั้งท้อง เป็นระยะที่ช่อดอกอ่อนของข้าวขยายตัวใหญ่ขึ้นจนเป็นช่อดอกที่สมบูรณ์ ตรงกาบใบตรงจะอ้วนพองขึ้น

- ระยะออกดอกและผสมเกสร ระยะที่ช่อดอกโผล่จากกาบใบ (heading) ดอกข้าวบาน (flowering) และผสมเกสร (fertilization) ซึ่งจะเกิดพร้อมกันหรือเหลื่อมกันบ้างเพียงเล็กน้อย

3) การพัฒนาของเมล็ด (grain development) ได้แก่ ระยะภายหลังการผสมเกสร โดยรังไข่ที่ได้รับการผสมจะเจริญเติบโต อาหารที่ได้รับจากการสังเคราะห์แสงจะถูกสะสมในเมล็ด ดังนั้นจึงเรียกระยะนี้ว่า ระยะสะสมในเมล็ด (grain filling period) ในระยะแรกจะอยู่ในระยะน้ำนม

(milky) เปลี่ยนเป็นแป้งอ่อน (dough) จนกระทั่งเมล็ดสุก (ripening) เป็นแป้งแข็งซึ่งเป็นระยะสุกแก่หรือเก็บเกี่ยว (harvest maturity) จะใช้เวลาการพัฒนาการของเมล็ดทั้งหมดประมาณ 25-30 วัน



รูปที่ 10 ระยะการเจริญเติบโตของข้าว

ที่มา : Stansel, 1975

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าว (ไสว พงษ์เก๋า และคณะ, 2525; จำรัส

โปรงศิริวัฒนา, 2534 และ คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่ไรนา, 2542) (ไสว พงษ์เก๋า และคณะ, 2525; (จำรัส โปรงศิริวัฒนา, 2534) และ (คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่ไรนา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542)

สภาพนิเวศวิทยาของข้าวนั้นพบว่า ข้าวสามารถปรับตัวได้ดีตั้งแต่เส้นรุ้งที่ 49 องศาเหนือ (ประเทศสาธารณรัฐเชค) จนถึง 35 องศาใต้ (รัฐนิวเซาท์เวลส์ประเทศออสเตรเลีย) แต่ส่วนใหญ่จะพบอยู่ในเขตร้อนระหว่างเส้น topic of cancer (23 องศา 27 ลิปดาใต้) ซึ่งได้แก่ประเทศต่างๆในเอเชียใต้ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ แอฟริกาตะวันตก อเมริกากลาง และอเมริกาใต้ ข้าวสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพดินฟ้าอากาศดังต่อไปนี้

1) ความสูงของพื้นที่ ข้าวขึ้นได้ตั้งแต่ระดับน้ำทะเลจนถึงที่สูง 2,500 เมตร สามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในที่ดอน (ข้าวไร่) และที่ลุ่มมีระดับน้ำตั้งแต่ 5 เซนติเมตร (ข้าวนาสวน) จนถึงหลายเมตร (ข้าวฟางลอย)

2) ดิน ขึ้นได้ดีในดินเกือบทุกชนิดยกเว้นดินทราย ส่วนใหญ่ชอบขึ้นในดินเหนียวและดินเหนียวร่วน มีความเป็นกรดและด่าง (พีเอช) ตั้งแต่ 3-10 ขึ้นได้แม้กระทั่งในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ

3) ปริมาณน้ำฝน มีความต้องการตั้งแต่ 875 มิลลิเมตรต่อปี (ข้าวไร่) จนถึง 2,000 มิลลิเมตรต่อปี (ข้าวนาสวน) แต่ควรมีการกระจายฝนที่ดีในพื้นที่ที่ไม่ได้รับน้ำชลประทานหรือที่เรียกว่า นาน้ำฝน ซึ่งส่วนใหญ่จะปลูกข้าวได้ในนาปีเท่านั้น และการตอบสนองต่อความต้องการน้ำยังขึ้นอยู่กับพันธุ์และช่วงของการเจริญเติบโต ในช่วงการเตรียมดินนั้นควรมีน้ำฝนประมาณ 150-200 มิลลิเมตรต่อปี ช่วงที่เป็นต้นกล้าประมาณ 250-400 มิลลิเมตรต่อปีจนถึงต้นกล้าอายุ 30-40 วัน ส่วนใหญ่ในช่วงปักดำจนกระทั่งเก็บเกี่ยวนั้นควรมีน้ำฝนอยู่ในระหว่าง 800-1,200 มิลลิเมตรต่อปี

4) แสงอาทิตย์ ปริมาณแสงมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตโดยที่พืชใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง และช่วงเวลาสั้นๆของกลางวันกลางคืนยังมีผลต่อการสืบพันธุ์ของข้าว ไวแสง สำหรับความเข้มข้นของแสงในฤดูฝนซึ่งมีเมฆหมอกมากนั้นจะมีความเข้มข้นน้อยกว่าฤดูร้อน ดังนั้นผลผลิตข้าวส่วนใหญ่จึงน้อยกว่า จากการรายงานพบว่าข้าวที่ปลูกในฤดูฝนจะให้ผลผลิตประมาณ 63 ถัง/ไร่ แต่ถ้านำพันธุ์เดียวกันไปปลูกในหน้าร้อนหรือหน้าแล้งจะได้ผลผลิตสูงถึง 73 ถัง/ไร่ (ใช้พันธุ์ กข 11 กข 7 และกข 1) แสงแดดจึงมีความจำเป็นมากในช่วงเริ่มสร้างดอกจนกระทั่ง 10 วันก่อนเมล็ดแก่

5) อุณหภูมิ ได้มีการศึกษาพบว่า อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของข้าว และการให้ผลผลิตโดยพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 25-33 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ต่ำหรือสูงเกินไป (ต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส และสูงกว่า 35 องศาเซลเซียส) จะมีผลต่อการงอกของเมล็ด การยืดของใบ การแตกกอ การสร้างดอกอ่อน และการผสมเกสร เป็นต้น และยังพบว่าอุณหภูมิที่สูงเกินไปและต่ำเกินไปในช่วงที่มีการออกดอกจะทำให้ดอกข้าวเป็นหมันซึ่งจะส่งผลทำให้ได้ผลผลิตต่ำกว่าปกติ

6) ความชื้นสัมพัทธ์ อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ในบรรยากาศต่อการเจริญเติบโตของข้าวนั้นมักจะไม่ใช่ชัดเจน เพราะจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นแสงกับอุณหภูมิในทางกลับกันกล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นแสงมากและอุณหภูมิสูง มักทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ และเมื่ออุณหภูมิลดลงในเวลากลางคืนทำให้เกิดน้ำค้างสูงจะมีผลต่อการพัฒนาของเชื้อโรคของข้าวบางชนิด เช่น โรคใบไหม้ เป็นต้น

7) ลม ลมที่พัดถ่ายเทอยู่ตลอดเวลา (ความเร็วประมาณ 0.75-2.25 เซนติเมตร/วินาที) จะช่วยให้มีการถ่ายเทก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงได้ดี ทำให้พืชสามารถ

สังเคราะห์แสงได้มากยิ่งขึ้น แต่ถ้าลมแรงจะมีผลโดยตรงทำให้ต้นข้าวหักล้ม เกิดความเสียหายต่อผลผลิตได้

8) ฤดูปลูก ปลูกได้ตลอดปี แต่ควรหลีกเลี่ยงช่วงการปลูกที่ต้นข้าวจะออกดอกในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า 33 องศาเซลเซียส และหลีกเลี่ยงการปลูกที่ต้องเก็บเกี่ยวในช่วงที่ฝนชุก เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพจึงจำเป็นต้องวางแผนการปลูกที่เหมาะสม

2.5.4 ประวัติความเป็นมาของข้าวดอกมะลิ 105 (ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริจังหวัดสกลนคร, 2555)

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105) เป็นพันธุ์ข้าวหอมที่ได้จากข้าวพันธุ์พื้นเมืองจากนาเกษตร อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยนายสุนทร สีหะเนิน เป็นผู้รวบรวมในปี พ.ศ. 2493-2494 จำนวน 199 รวง มาปลูกเพื่อศึกษาพันธุ์ ได้ข้าวรวงที่ 105 ที่มีลักษณะพิเศษคือเมื่อนำมาหุงต้มมีกลิ่นหอมและเมล็ดอ่อนนุ่ม จึงนำไปคัดเลือกแบบคัดพันธุ์บริสุทธิ์ (pure line selection) ในปี พ.ศ. 2498 ที่สถานีทดลองข้าวโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี ในปี พ.ศ. 2500 นำเข้าแปลงเปรียบเทียบพันธุ์ท้องถิ่นภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในปี พ.ศ. 2502 ได้รับการพิจารณาจากคณะกรรมการพิจารณาพันธุ์ข้าวให้ขยายพันธุ์และส่งเสริมให้เกษตรกรปลูกเป็นพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2502

ลักษณะทั่วไปของข้าวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวเจ้าไวต่อช่วงแสง ต้นสูงประมาณ 140-150 เซนติเมตร ลำต้นสีเขียวจาง ใบสีเขียวยาวค่อนข้างแคบ ฟางอ่อน ใบธงทำมุมกับคอรวง เมล็ดข้าวรูปร่างเรียวยาว ข้าวเปลือกสีฟาง ก้านงอน ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 8 สัปดาห์ ขนาดเมล็ดข้าวกลี้ยงยาว 7.5 มิลลิเมตร กว้าง 2.1 มิลลิเมตร หนา 1.8 มิลลิเมตร (รูปที่ 11) คุณภาพข้าวสุกนุ่ม มีกลิ่นหอม ผลผลิตประมาณ 363 กิโลกรัมต่อไร่ ทนแล้งได้ดีพอสมควร เมล็ดข้าวสารใส แกร่ง คุณภาพการสีดี ทนต่อสภาพดินเปรี้ยว และดินเค็ม ข้อควรระวังคือ ไม่ต้านทานโรคใบสีส้ม โรคขอบใบแห้ง และโรคใบหงิก ไม่ต้านทานเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล เพลี้ยจักจั่นสีเขียว และหนอนกอ พื้นที่ที่เหมาะสมในการเพาะปลูกคือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือ



รูปที่ 11 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105

ที่มา : (ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริจังหวัดสกลนคร, 2555)

2.6 กระดูกหมู (Swine Bone)

2.6.1 องค์ประกอบของกระดูกสัตว์

กระดูกสัตว์มีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์หรือไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทไขมัน น้ำมันและไขมันแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมซัลเฟต และสารอื่นๆ อีกเล็กน้อย อัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca/P) เท่ากับ 1.67 (วรรณา ไชยิตะมงคล, 2538) องค์ประกอบของกระดูกเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาวะการเตรียม เช่น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน การกระตุ้นด้วยกรด เกลือ ต่าง สุขาคา สุขาทิพิบูลย์ (2547) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์กระดูกก่อนและหลังการกระตุ้นพบว่าอัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสของถ่านกัมมันต์กระดูกมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกระดูกที่ยังไม่ถูกกระตุ้น

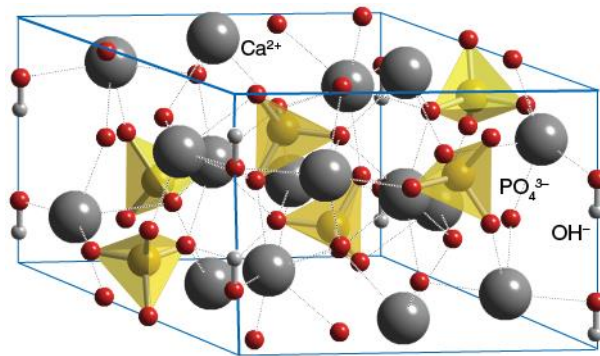
ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่เป็นสารอนินทรีย์ในกระดูก ซึ่งก็คือสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตรูปแบบหนึ่ง โดยจะเป็นตัวกำจัดการประเภทโมเลกุลประจุบวกประเภทไอออนอนินทรีย์ (inorganic ion) ได้หลายชนิด ด้วยแรงทางประจุซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวบนผิวคาร์บอน (Coporation, 2015) จากองค์ประกอบหลักนี้เองจึงทำให้กระดูกสัตว์มีคุณสมบัติพิเศษ คือมีส่วนทั้งที่เป็นขั้วบวกและขั้วลบอยู่ในตัว จึงทำให้สารดูดซับ

ที่เตรียมจากกระดูกสัตว์แตกต่างจากสารดูดซับชนิดอื่น ๆ ที่มีขี้หรือประจุชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียว (สุชาติ สุธธิพิบูลย์, 2547) สารดูดซับที่เตรียมจากกระดูกสัตว์จึงมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดทั้งไอออนบวก (Biomim, 2004; Ko et al., 2004; สุชาติ สุธธิพิบูลย์, 2547; จักรพงษ์ แสนชัย, 2548) และไอออนลบ ; (สุชาติ สุธธิพิบูลย์, 2547); (จักรพงษ์ แสนชัย, 2548) (Brown และคณะ, 1992; ; (Cheung, Chan, Porter, & McKay, 2001); Pulford, 2001: (Mjengera & Mkong, 2003); ; (อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ, 2544); (ศุภกิจ พัฒนเดชะ, 2545) และ Phatumvanit และ Legeros, 1997) นอกจากนี้เมื่อทำการดูดซับด้วยกระดูกแล้วตัวดูดซับจะถูกยึดติดทางเคมีภายในโครงร่างผลึกแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เคมิซอร์บชัน (Chemisorption) และไม่พบคุณสมบัติในสารที่มีองค์ประกอบคาร์บอนทั่วไป ดังนั้นจึงเป็นปัจจัยที่ทำให้กระดูกมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้หลายชนิด นอกจากนี้กระดูกยังสามารถใช้ในการดูดซับสี กลิ่น รส และตะกั่ว และโลหะหนักชนิดอื่นและสารอินทรีย์ในน้ำได้อีกด้วย

2.6.2 โครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

Beevers (1945) อ้างถึงใน สุดารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์ (2551) ได้ศึกษาโครงสร้างอะตอมของแร่ฟลูออโรอะพาไทต์เปรียบเทียบกับโครงสร้างอะตอมของฟันและวัสดุประเภทกระดูก โดยการวิเคราะห์ผลึกด้วยเอ็กซเรย์ (X-ray crystal analysis) พบว่ากระดูกมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนัล (hexagonal) มีมิติของผลึกดังนี้คือ

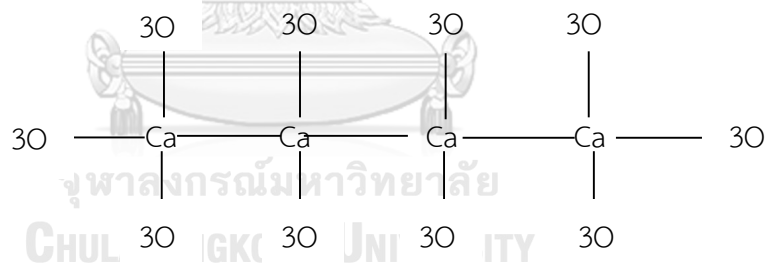
ด้าน a และ ด้าน b เท่ากันยาว 9.4180 ด้าน c ยาว 6.8840 Å มุมของ ผลึกรูปหกเหลี่ยมคือ มุมอัลฟาและเบตามีขนาด 90 องศา มุมแกมมามีขนาด 120 องศา และมีโครงสร้างผลึกใกล้เคียงกันมากกับโครงสร้างผลึกแร่ฟลูออโรอะพาไทต์ (mineral fluoro-apatite : $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$ ซึ่งมีมิติของผลึกด้านทั้งสามดังนี้ ด้าน a และด้าน b เท่ากันยาว 9.4100 Å ด้าน c ยาว 6.8800 Å มีความสมมาตรของแกนตามแนวตั้ง (vertical symmetry-axes) และตามแนว ที่ลากผ่านจุดกึ่งกลางของด้านหกเหลี่ยมอีกสี่ด้าน ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 โครงสร้างของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

ที่มา : <http://www.chemtube3d.com/solidstate/SShydroxyapatite.htm>

โครงสร้างของผลึกแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีอะตอมแคลเซียมแต่ละอะตอมจับกับ 9 อะตอมของออกซิเจนตามแนวระนาบ 3 อะตอม ข้างบน 3 อะตอม ข้างล่าง 3 อะตอม เขียนแทนการจัดเรียงอะตอมได้ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 โครงสร้างของผลึกแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

2.7 การใช้พืชบำบัด (Phytoremediation)

2.7.1 นิยามของการใช้พืชบำบัด

การบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation) มาจากคำราชาศัพท์คำว่า “Phyto” ในภาษากรีกที่หมายถึง “พืช” รวมกับคำว่า “Remedium” ในภาษาละติน หมายถึง “การแก้ไขหรือการบำบัดเป่าสิ่งชั่วร้าย” (Cunningham et al., 1996) เมื่อนำทั้งสองคำนี้มารวมกัน หมายถึง การนำพืชมาใช้ในการบำบัดดิน กากตะกอน หรือน้ำ ที่เกิดการปนเปื้อนโดยสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ Agbontalor (2007) ซึ่งการบำบัดนี้อาศัยประโยชน์จากกระบวนการดูดน้ำและแร่ธาตุอาหารผ่านทางรากของพืช และกระบวนการคายน้ำออกทางใบของพืชในการเปลี่ยนสารปนเปื้อนเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่ไม่มีความเป็นพิษหรือมีความเป็นพิษลดลงซึ่งกลไกเหล่านี้ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปสารประกอบอินทรีย์ (เช่น น้ำมัน สารปราบศัตรูพืช เป็นต้น) หรือดูดซับและสะสมจุลธาตุที่เป็นพิษ ได้แก่ โลหะหนักต่าง ๆ เช่น ตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี ไว้ในลำต้น ซึ่งสารประกอบ หรือโลหะหนักเหล่านี้จะถูกกำจัดออกจากพื้นที่เมื่อมีการเก็บเกี่ยวพืชออกไป บางครั้งอาจจะเรียกเทคโนโลยีการทำ Phytoremediation นี้ว่า botano-remediation, green remediation, Phytoremediation หรือ Phytoremediation technologies (McCutcheon & Schnoor, 2003)

ดินที่ไม่มีการปนเปื้อนโลหะหนักจะมีแคดเมียมต่ำกว่า 0.5 mg/kg แต่ก็สามารถมีได้ถึง 3 mg/kg ขึ้นอยู่กับดินต้นกำเนิด แคดเมียมเป็นมลพิษที่มีอันตราย มีความเป็นพิษสูง และบางรูปแบบสามารถละลายน้ำได้ ซึ่งที่ระดับความเข้มข้นต่ำแคดเมียมจะไม่มีพิษกับพืช แต่ถ้ามีระดับความเข้มข้นสูงขึ้นจะเป็นพิษต่อพืช โดยสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของรากและเซลล์พืชได้ เช่น หัวหอม กระเทียม และถั่ว (Jiang, Liu, & Hou, 2001 และ Wang et al., 2007)

ปกติปริมาณจุลธาตุ (Trace Element) ที่มีอยู่ในดินที่ปราศจากการปนเปื้อนของเสียอันตราย มีค่าผันแปรได้ตามวัตถุดิบกำเนิด (Parent Materials) ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic Matter) เนื้อดิน (Soil Texture) และระดับความลึกของดิน (Soil Depth) เป็นต้น

(Murakami, Ae, & Ishikawa, 2007) ทำการศึกษาการสะสมแคดเมียมโดยใช้พืช 3 ชนิด คือ ข้าว ถั่วเหลือง และข้าวโพด ทำการทดลองในเรือนเพาะชำ โดยใช้ดินนาที่มีระดับการปนเปื้อนแคดเมียมเท่ากับ 0-83-4.29 mg/kg เป็นระยะเวลา 60 วัน ผลจากการศึกษาพบว่า พืชทั้ง 3 ชนิดมีการดูดดึงแคดเมียมไว้ที่รากมากกว่าส่วนยอด โดยข้าวมีการดูดดึงแคดเมียมมากกว่าถั่วและข้าวโพด มีค่าเท่ากับ 187, 116 และ 19 mg/kg ตามลำดับ

2.7.2 ประเภทของ Phytoremediation

2.7.2.1 Rhizofiltration คือ ระบบที่มีการกรองน้ำผ่านรากพืชเข้ามาเพื่อลดความเป็นพิษของสารหรือธาตุอาหารที่ถูกดูดซับเข้ามา มลสารจะถูกดูดซับไว้ที่รากซึ่งรากพืชสามารถดูดซึมสารอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนละลายอยู่ในน้ำใต้ดินและนำมาเก็บสะสมไว้ในราก (Ensley, 2000) กระบวนการนี้นิยมนำมาใช้ในการบำบัดน้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อนผ่านพืชที่ปลูกในบริเวณปนเปื้อนโดยตรงหรือปลูกนอกพื้นที่ปนเปื้อน

2.7.2.2 Phytoextraction or Phytoaccumulation คือ พืชที่มีมวลมาก พืชที่สะสมโลหะได้และสามารถปรับปรุงดินโดยการเคลื่อนย้ายโลหะที่เข้มข้นในดินไปสู่ส่วนของลำต้นที่อยู่เหนือพื้นดิน โดยจะเก็บสะสมไว้ในเนื้อเยื่อพืชทั้งในส่วนของรากและลำต้น ซึ่งต่อมากจะถูกเก็บเกี่ยวด้วยวิธีการทางการเกษตรแบบปกติ (Ensley, 2000), (มลิวรรณ บุญเสนอ, 2548)

2.7.2.3 Phytotransformation คือ พืชช่วยย่อยสลายสารปนเปื้อนที่มีโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงและนำสารโมเลกุลเล็กนั้นไปใช้ในการสร้างเนื้อเยื่อ (มลิวรรณ บุญเสนอ, 2548)

2.7.2.4 Phytostimulation คือ การที่รากพืชปล่อยเอ็นไซม์ออกมากระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ที่อยู่ในบริเวณนั้น ทำให้สารถูกย่อยสลาย (มลิวรรณ บุญเสนอ, 2548)

2.7.2.5 Phytostabilization คือ พืชที่ทำให้มลสารในดินเกิดความเสถียร มลสารเหล่านั้นจึงไม่ก่อให้เกิดอันตราย หรือพืชที่สามารถป้องกันการปนเปื้อนจากการเคลื่อนย้ายโดยลดการไหลของน้ำ (runoff) การกัดกร่อนผิวน้ำดิน และอัตราการไหลของน้ำใต้ดิน โดยรากพืชจะดูดน้ำใต้ดินในปริมาณมาก ทำให้สามารถควบคุมและป้องกันการเคลื่อนย้ายของสารปนเปื้อนให้อยู่ในเขตน้ำใต้ดิน (Ensley, 2000)

2.7.2.6 Phytoevapotranspiration คือ พืชที่สามารถสกัดและเคลื่อนย้ายโลหะที่ระเหยได้ (เช่นปรอท ซีลีเนียม) จากดิน หรือสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน (Ensley, 2000) และปลดปล่อยโดยการคายน้ำหรือการระเหยกลายเป็นไอของสารปนเปื้อนไปสู่บรรยากาศออกทางใบ (Hazardous Substance Research Center, 2002 อ้างถึงใน (บุญตา อ๊อบ และ วันชัย วงษ์วิไล, 2546)

2.7.2.7 Uptake (การดูดซับ) และเก็บสะสมไว้ในลำต้นหรือใบของพืชบางชนิดเรียกว่า Hyperaccumulator โดยมลสารจะผ่านเข้าไปทางรากและเมื่อมลสารถูกสะสมอยู่ในลำต้นและใบของพืชที่ถูกเก็บเกี่ยว ซึ่งพืชเหล่านี้สามารถที่จะนำไปขายได้ แต่หากพืชไม่สามารถใช้ประโยชน์อื่นได้ก็จะนำไปเผา ซึ่งการบำบัดโดยวิธีนี้จะถูกกว่าวิธีการบำบัดแบบดั้งเดิม มีการรายงานว่ามีปริมาณดินที่มีการปนเปื้อน 5,000 ตัน จะทำให้เกิดการเผาพืชเพียง 20-30 ตันเท่านั้น (Blavk, 1995 อ้างถึงใน Kelly, 1997) วิธีนี้จึงเป็นวิธีการกำจัดโลหะที่มีประโยชน์อย่างยิ่ง

2.7.3 ความสัมพันธ์ของพืชกับโลหะหนักในบริเวณรากพืช

ปัจจัยของข้อจำกัดของการดูดซับโลหะภายในรากพืช คือ การเคลื่อนย้ายแบบช้าๆ จากอนุภาคดินสู่ผิวราก สำหรับโลหะทุกชนิดยกเว้นปรอทที่ระเหยได้ การเคลื่อนย้ายนี้เกิดขึ้นในสารละลายดิน ความสามารถในการละลายของโลหะจะถูกจำกัดเนื่องจากการดูดซับ (Absorption) กับอนุภาคดิน การเพิ่มความสามารถในการละลายของโลหะในดินจึงเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มศักยภาพในกระบวนการ Phytoextraction โดยกลไกที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายโลหะจากดินสู่รากพืชมีดังนี้ 1) การพา (Convection) หรือ Mass Flow และ 2) การแพร่ (Diffusion) (Corey และคณะ, 1984 อ้างถึงใน (ศิริลักษณ์ กล้าการชาย และธนชัย กองแก้ว, 2548) เนื่องจากการพาไอออนโลหะที่ละลายน้ำจะเคลื่อนที่จาก Soil solids ไปยังผิวรากจากบริเวณ Rhizosphere น้ำจะถูกดูดซึมโดยรากพืชเพื่อนำมาใช้แทนที่น้ำที่ถูกหายใจโดยใบ โดยการดูดน้ำจากบริเวณรากจะสร้าง Hydraulic Gradient โดยตรงจากดินไปยังผิวราก ไอออนบางตัวจะถูกดูดซึมโดยรากพืชมากกว่าอัตราของการใช้น้ำผ่าน mass flow ดังนั้นจะมีพื้นที่ที่ไม่มีอะไรอยู่เลยที่ถูกสร้างขึ้นใกล้กับรากพืชซึ่งสร้าง Concentration Gradient โดยตรงจากสารละลายดินและอนุภาคดินที่จับตัวกับธาตุที่ถูกยึดอยู่ และสารละลายจะสัมผัสกับพื้นผิวของรากโดยมี Concentration Gradient เป็นตัวกระตุ้นการแพร่ของไอออนไปยังชั้นที่ว่างเปล่าที่อยู่รอบๆรากพืช

พืชมีกลไกพิเศษของการเพิ่มความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายดิน ยกตัวอย่างเช่น ที่ปริมาณการใช้ไอออนต่ำๆพืชอาจจะเปลี่ยนสิ่งแวดล้อมทางเคมีของบริเวณรากพืชเพื่อกระตุ้นการปล่อยไอออนจากของแข็งในดินเข้าไปในสารละลาย เช่น กลไก Rhizosphere acidification อันเนื่องมาจาก H^+ ที่ออกมาจากราก (Crowley และคณะ, 1991) นอกจากนี้พืชบางชนิดสามารถควบคุมความสามารถในการละลายของโลหะในบริเวณรากโดยปล่อยสารประกอบอินทรีย์ต่างๆออกมาจากราก ซึ่ง root exudates complex metal ions จะเก็บไว้ในสารละลายสำหรับดึงดูดเข้าไปในราก (Romheld และ Marschner, 1986)

2.7.4 รูปของแคดเมียมในดิน

แคดเมียมในหินอัคนี (Magmatic Rocks) และหินตะกอน (Sedimentary Rocks) จะมีปริมาณไม่เกิน 0.3 mg/kg ในการสลายตัวของดิน แคดเมียมจะอยู่ในสภาพละลายน้ำได้ง่ายและอยู่ในรูปแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) และสามารถอยู่ในรูปไอออนแคดเมียมเชิงซ้อน (Complex Ions) อื่นด้วย เช่น $CdCl^+$, $CdOH^+$, $CdCl_3^-$, $CdCl_2^0$, $CdCl_3^-$, $CdCl_4^{2-}$, $Cd(OH)_3^-$ และ $Cd(OH)_4^{2-}$ ยกตัวอย่างเช่น ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนสูง ทำให้การดูดซับแคดเมียมในพืชมีค่าเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในดิน ทำให้ความเข้มข้นของแคดเมียมในพืชเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า การดูดซับแคดเมียมในพืชดังกล่าวเป็นผลมา

Akkajit and Tongcumpou (2010) ศึกษาสัดส่วนของโลหะในดินปนเปื้อนแคดเมียมจากการศึกษาชี้ให้เห็นว่า โลหะที่อยู่ในรูปที่แตกตัวได้ง่าย (BCR1) คือ แคดเมียม ร่องลงมาได้แก่ แมงกานีส สังกะสี ตะกั่ว ทองแดง และเหล็ก ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแคดเมียมอยู่ในรูปของสารประกอบที่ไม่แข็งแรงและง่ายต่อการเคลื่อนที่เข้าสู่พืช ส่งผลให้โลหะกระจายเข้าสู่ระบบนิเวศและเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้ง่าย รูปของโลหะ (ยกเว้นทองแดง และเหล็ก) โดยส่วนใหญ่จะสัมพันธ์กับส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (BCR2) ซึ่งถือว่ามากกว่าร้อยละ 40 ของความเข้มข้นโลหะทั้งหมด ความเข้มข้นของโลหะในรูปต่างๆมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละพื้นที่ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ (BCR1) มีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมด และสังกะสีและตะกั่วในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ บ่งบอกถึงปฏิกิริยาบางอย่าง และ/หรือ ความสัมพันธ์เกิดขึ้นอยู่แล้วระหว่างโลหะเหล่านี้ (Cd, Pb และ Zn)

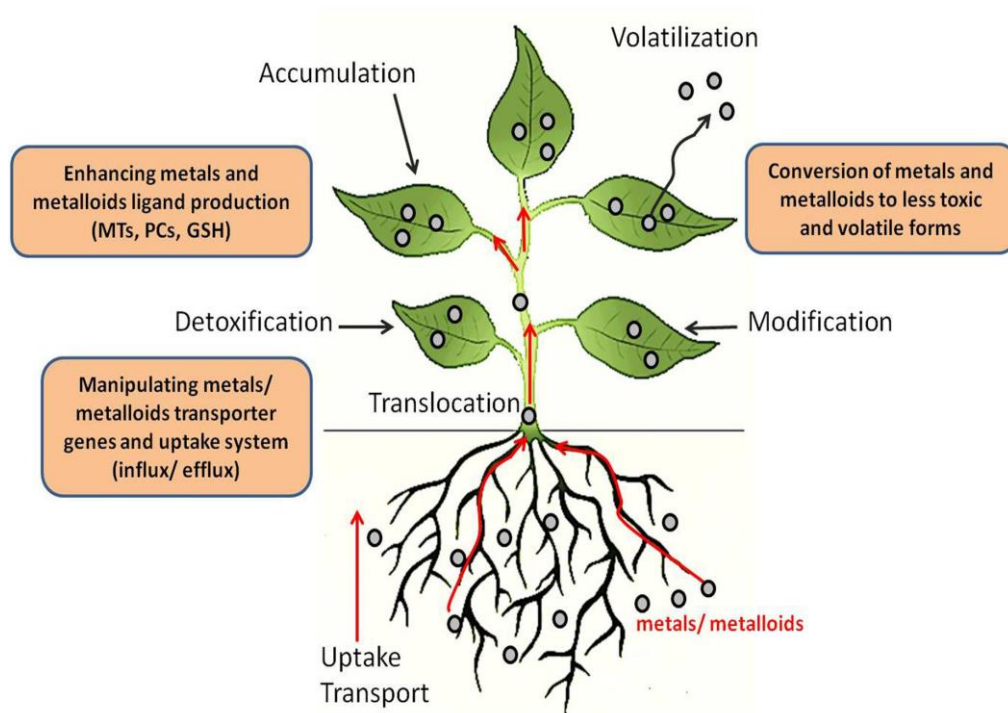
Sriprachote et al. (2014) ศึกษาสัดส่วนของแคดเมียมและสังกะสีในดินจากบ้านพะเต๊ะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก พบว่า โดยส่วนใหญ่ สัดส่วนของแคดเมียมในดินปนเปื้อนพบว่าอยู่ในส่วนที่สามารถแลกเปลี่ยนได้และส่วนที่ถูกดูดยึดด้วยคาร์บอนตร้อยละ 40-70 ในขณะที่ดินที่ไม่มีการปนเปื้อนแคดเมียมจะอยู่ในส่วนที่คงเหลืออยู่ในดินร้อยละ 50-80 สำหรับสัดส่วนของสังกะสีในดิน พบว่า ส่วนใหญ่ในดินที่ไม่มีการปนเปื้อนและดินที่ตอนน้ำขัง จะอยู่ในส่วนที่คงเหลืออยู่ในดินร้อยละ 37-46 ในทางกลับกันสัดส่วนหลักของสังกะสีในดินที่ลุ่มมีความสัมพันธ์กับสังกะสีในส่วนที่ถูกยึดด้วยออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ร้อยละ 36 ของสังกะสีทั้งหมด จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเคลื่อนที่และศักยภาพในการนำแคดเมียมและสังกะสีไปใช้ของพืชในดินปนเปื้อน (ร้อยละ 61 และ 25) จะมีค่าสูงกว่าดินที่ไม่ปนเปื้อน (ร้อยละ 15 และ 19 ตามลำดับ) การกระจายตัวของส่วนประกอบทางเคมีของโลหะในดินจะแปรผันไปตามความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะ

ภาราดา มณีวงศ์ (2548) ศึกษาการกระจายตัวของแคดเมียมในตะกอนท้องน้ำและตะกอนแขวนลอยจากห้วยแม่ดาว ห้วยแม่กุ และ ห้วยหนองเขียว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก จากผลการศึกษาพบว่า ห้วยแม่ดาวซึ่งรับน้ำโดยตรงจากตอผาแดง มีปริมาณแคดเมียมมากกว่าห้วยอื่นๆทั้งในตัวอย่างดินตะกอนและตะกอนแขวนลอย ขณะที่ห้วยหนองเขียวพบปริมาณแคดเมียมต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาส่วนประกอบทางเคมีของแคดเมียมในห้วยแม่ดาว พบว่า อยู่ในรูปที่สามารถแตกตัวได้ง่าย (BCR1) และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูง ส่วนในห้วยแม่กุพบว่าแคดเมียมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ BCR2 และในรูปของแคดเมียมที่แตกตัวยากที่สุด (Final Residue) นั่นก็คือแคดเมียมที่อยู่ในส่วนที่ถูกยึดด้วยซิลิเกต และห้วยหนองเขียวพบว่า ส่วนใหญ่อยู่ในส่วนประกอบที่แตกตัวได้ยาก จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าห้วยแม่ดาวเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของแคดเมียมในพืชและสิ่งมีชีวิตมากกว่าห้วยอื่นๆในพื้นที่ศึกษา

ศิริลักษณ์ จันทรโพธิ์ (2548) ศึกษาการกระจายตัวของแคดเมียมและสังกะสีในดิน บริเวณลุ่มน้ำแม่กุ ตำบลแม่กุ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งพบว่าปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดซึมได้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.03-63.78 และ 2.04-1,033.92 mg/kg ตามลำดับ อัตราส่วนระหว่างแคดเมียมและสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดซึมได้ และแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 0.4 และ 0.02 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าพื้นที่แม่กุมีการปนเปื้อนของแคดเมียม ซึ่งกิจกรรมต่างๆของมนุษย์เป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญของการปนเปื้อนแคดเมียม โดยเฉพาะเหมืองสังกะสี ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นที่ภูเขาสูง โดยน้ำฝนซึ่งไหลมาจากพื้นที่ดังกล่าวเป็นตัวการสำคัญในการพัดพาตะกอนดินซึ่งมีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบจากพื้นที่สูงลงสู่ที่ราบน้ำท่วมถึง ดังนั้นแคดเมียมในตะกอนจะถูกสะสมในดิน และเป็นสาเหตุของการปนเปื้อนแคดเมียมในดินที่สำคัญในพื้นที่แม่กุ

2.7.5 กลไกการดูดดึงแคดเมียมของพืช

กลไกการดูดดึงแคดเมียมจากดินของพืชสามารถอธิบายได้จากหลักการของการสะสมแคดเมียมในพืช ซึ่งกลไกของการดูดดึงแคดเมียมประกอบไปด้วย 1) การดูดดึงของแคดเมียมจากการละลายที่บริเวณผิวของราก 2) การดูดซึม (Absorption) และการลำเลียง (Transport) ของแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ไปตามเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell Plasma Membranes) ของเซลล์ราก (รูปที่ 15) โดยถูกควบคุมโดยความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Potential) ของกิจกรรมของแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ระหว่างไซโตพลาสซึม (Cytosol) ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีของเซลล์พืช และเป็นที่เก็บสะสมของวัตถุดิบสำหรับเซลล์และในอะโพลลาสซึม (Apoplasms) ของราก ซึ่งเป็นกระบวนการดูดซึมธาตุโลหะหนักโดยกระบวนการทางฟิสิกส์ที่เรียกว่า Passive Absorption ทำให้แคดเมียมถูกดูดผ่านภายในรากพืชทางช่องว่างระหว่างเซลล์ (Free Space) นอกจากนี้โลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูงก็สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้อย่างรวดเร็วด้วย โดยมีการเคลื่อนที่ผ่านเอนโดเดอริส (Endodermis) ซึ่งเป็นเนื้อเยื่อที่อยู่ด้านนอกของเนื้อเยื่อลำเลียงรากเพื่อเข้าไปสู่ท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) อย่างไรก็ตามสารประกอบแคดเมียมเชิงซ้อนที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ (Organic) ส่วนใหญ่มีการเคลื่อนย้ายทางท่ออาหาร (Phloem) 3) การเคลื่อนที่ภายใน และระหว่างเซลล์ของแคดเมียม และ 4) ระยะเวลาของการเคลื่อนย้าย (Translocation) และการสะสม (Deposition) ของแคดเมียมในส่วนของพืช เป็นต้น นอกจากนี้ กิจกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นในบริเวณราก ซึ่งแคดเมียมสามารถละลายเพิ่มขึ้นได้ในบริเวณที่เรียกว่า ไรโซสเฟียร์ (Rhizosphere) นั้น ก็อาจมีผลทำให้ปริมาณของแคดเมียมมีความสามารถในการแพร่กระจายออกไปยังผิวของรากด้วยเช่นกัน (McLaughlin & Singh, 1999; Welch & Norvell, 1999)



รูปที่ 15 กระบวนการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation Processes)

ที่มา : Eevers et al., 2017

Liu et al., (2006) ศึกษาการดูดตั้งและการเคลื่อนย้ายแคดเมียมในข้าว 6 สายพันธุ์ โดยพบว่า ปริมาณแคดเมียมที่ข้าวดูดตั้งเข้าไปมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ประมาณ 0.73 เปอร์เซ็นต์ที่สามารถเข้าไปสะสมอยู่ในส่วนของเมล็ด นอกจากนี้แล้วยังพบความแตกต่างของปริมาณแคดเมียมทั้งหมด ความเข้มข้นของแคดเมียม และปริมาณการสะสมแคดเมียมที่อยู่ในราก ลำต้น และใบของข้าวแต่ละสายพันธุ์นั้นไม่มีความแตกต่างกัน แต่ความแตกต่างของปริมาณแคดเมียมทั้งหมด ความเข้มข้นของแคดเมียม และปริมาณการสะสมแคดเมียมที่อยู่ในเมล็ดของข้าวแต่ละสายพันธุ์นั้นมีความแตกต่างกัน อีกทั้งยังพบว่าค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแคดเมียมที่จุ่มข้าวนั้นมีปริมาณมากกว่าในเปลือกและเมล็ดข้าวที่ขัดสีแล้วถึง 5 เท่า และยังพบว่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในผลผลิตข้าวนั้นอยู่ที่จุ่มข้าว เมล็ดข้าวที่ขัดสีแล้ว และเปลือกข้าว มีค่าเท่ากับร้อยละ 40, 45 และ 15 ตามลำดับ สรุปได้ว่ารากข้าวมีความสามารถในการดูดตั้งแคดเมียมและเคลื่อนย้ายแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินไปยังส่วนของยอดข้าวและส่งต่อไปยังเมล็ดข้าว ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แคดเมียมมีการกระจายตัวหรือเคลื่อนที่ไปยังส่วนอื่นๆของข้าวที่อยู่เหนือดินได้

2.7.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดตั้งโลหะหนักโดยพืช (อรรณพ หอมจันทร์, 2544)

1) ชนิดของโลหะหนัก

ชนิดของโลหะหนักนั้นมีส่วนสำคัญมากในการที่พืชจะดูดตั้งโลหะหนักเหล่านี้ออกจากดิน เนื่องจากพืชนั้นมีความสามารถในการดูดตั้งโลหะหนักในแต่ละชนิดได้ไม่เท่ากัน กล่าวคือ พืชจะดูดตั้งโลหะหนักชนิดที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าโลหะหนักชนิดที่ส่งผลเป็นพิษต่อพืชเพียงอย่างเดียว

ดวงกมล คำสอน และ ชมพูนุท ไชยรักษ์ (2556) ได้ศึกษาการสะสมโลหะของทานตะวันสายพันธุ์แปซิฟิก 77 ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว สังกะสี และทองแดง จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักที่สะสมสมในเมล็ดทานตะวัน มีปริมาณการสะสมจากมากไปน้อยดังนี้สังกะสี > ทองแดง > ตะกั่ว

2) รูปทางเคมีของโลหะหนัก

การดูดตั้งโลหะหนักโดยพืชนั้นส่วนใหญ่แล้วโลหะหนักในรูปเกลืออนินทรีย์ (inorganic soil) ที่ละลายน้ำแล้วนั้นพืชจะสามารถดูดตั้งเข้าไปได้มากกว่าโลหะหนักในรูปสารประกอบอินทรีย์ (Organic compound)

3) ความเป็นกรดต่าง (พีเอช)

ดินที่ทั้งประจุบวกและลบ แต่จะมีค่าประจุลบมากกว่า ด้วยความเป็นประจุนั้นบวามีประโยชน์อย่างมาก เพราะธาตุอาหารของพืชโดยส่วนใหญ่มีประจุเป็นบวก จึงถูกดินดูดซับเอาไว้ ทำให้พืชดึงดูดเอาไปใช้ได้ แคดเมียมเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 4.5-5.5 ซึ่งสภาพละลายได้ (Solubility) ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ในขณะที่ดินเป็นด่าง แคดเมียมไม่ค่อยเคลื่อนที่ ดังนั้นการใส่ปูนขาวเพื่อลดความเป็นกรดจะสามารถลดการละลายได้ และทำให้ลดการดูดตั้งของพืชได้เช่นกัน (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545)

พืชสามารถเจริญเติบโตได้ในค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่แตกต่างกัน โดยพืชส่วนมากสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดในดินที่มีค่าความเป็นกรดอ่อนๆ (Slightly Acid Soil) มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 6.5-6.8 ในขณะที่พืชบางชนิด เช่น พืชตระกูลถั่วชอบดินที่เป็นกลาง (Neutral Soil) (พีเอช 7.0) มากกว่าดินกรด (พีเอช < 7.0) (Kohnke & Franzmeier, 1994) ดังตารางที่ 8

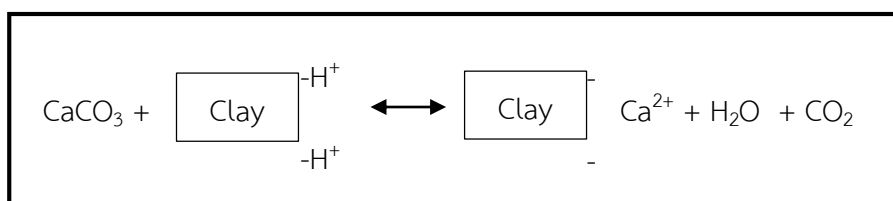
ตารางที่ 8 ชนิดพืชที่สามารถเจริญเติบโตในดินที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างแตกต่างกัน

ความเป็นกรดน้อย พีเอช 6.5-7.0	ความเป็นกรดปานกลาง พีเอช 5.5-6.4	ความเป็นกรดจัด พีเอช 4.5-5.4	ความเป็นกรดรุนแรง พีเอช ต่ำกว่า 4.5
ทานตะวัน	ถั่วเหลือง	ชา	แตงโม
มันสำปะหลัง	ยาสูบ	สับปะรด	แต้ว
กะหล่ำปลี	ข้าวฟ่าง	ปอเทือง	มะกอก
แตงกวา	ข้าวโพด	สตรอเบอร์รี่	มะดัน
หอมใหญ่	ฝ้าย	แครอท	
พริกไทย	มะนาว	ข้าว	
กล้วย	มะม่วง	ยางพารา	
ถั่วต่างๆ	ส้ม	กาแฟ	
อ้อย	ถั่วลิสง	ข้าวสาลี	
ปอ	ฟัก	มันฝรั่ง	

ที่มา : อภิรติ อิมเอิบ, 2534 อ้างถึงใน มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544

ดินที่เป็นกรด (Low pH) มีสาเหตุมาจากการยึดจับของไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen ions) ที่มากเกินไปกับอนุภาคของดินเหนียว (Clay Particles) ซึ่งในสภาวะเช่นนี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการเติมปูนขาว (Lime; Calcium Carbonate) จะทำให้ดินเกิดความเป็นด่างขึ้น ดังรูปที่ 16 การปรับสภาพความเป็นกรดต่างของดินให้เหมาะสมจะทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดี สามารถกำจัดสารมลพิษให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

Escrig and Morell (1998) รายงานว่า การเติมเกลือแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ลงไปในดิน ทำให้ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมลดลง 3 เท่า เมื่อเติมเกลือในปริมาณ 10 เท่า เนื่องจากไอออน Ca^{2+} สามารถแทนที่ Cd^{2+} ได้ (Kabata-Pendias, 2010) (Kabata-Pendias และ Pendias, 2000)



Calcium Carbonate (Lime)	Acid Clay	Neutral Clay	Water	Carbon dioxide
--------------------------------	--------------	-----------------	-------	-------------------

รูปที่ 16 ปฏิกิริยาของแคลเซียมคาร์บอเนตกับอนุภาคของดินเหนียว

ที่มา : Kohnke และ Franzmeier, 1994

4) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity; CEC)

ดินมีประจุไฟฟ้าเนื่องจากอนุภาคดินเหนียว (Clay Mineral) และอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter) ทำให้สามารถดูดยึดไว้ในดินหรือคอลลอยด์ดิน (Soil Colloid) ซึ่งค่า CEC ขึ้นอยู่กับชนิดของคอลลอยด์ดิน ปริมาณของดินเหนียวที่มีอยู่ในดิน และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน แร่ดินเหนียวต่างชนิดกัน จะมีค่า CEC ต่างกันมาก เช่น ในดินที่มีฮิวมัสมาก จะมีค่า CEC สูง เช่นเดียวกับดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวสูง แคตไอออนจะดูดยึดที่ผิวของแร่ดินเหนียว ดังนั้นการชะละลายของพวกแคตไอออนจึงไม่สามารถทำได้ง่าย ทำให้รากพืชสามารถดูดดึงแคตไอออนจากผิวของดินเหนียวไปใช้ประโยชน์ได้ ในดินทั่วไป CEC ของหน้าดินมีค่าระหว่าง 0.5-50 me/100g (Keenee และ Wilding, 1977 อ้างถึงใน ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) ได้แสดงระดับ CEC ของดินไว้ในตารางที่ 9 ถ้าระดับ CEC ของดินต่ำ แสดงว่าดินชนิดนั้นมีปริมาณอนุภาคดินเหนียวหรืออินทรีย์วัตถุน้อย

ตารางที่ 9 ระดับ CEC ของดิน

ระดับ	ค่า CEC (me/100g)
ต่ำมาก	<3
ต่ำ	3-5
ต่ำปานกลาง	5-10
ปานกลาง	10-15
สูงปานกลาง	15-20
สูง	20-30
สูงมาก	>30

ที่มา : ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545

5) เนื้อดินและโครงสร้างดิน

โครงสร้างของดินเกิดจากการเกาะยึดกันของอนุภาคดิน และมีตัวเชื่อมทั้งสารอินทรีย์และไอออนต่างๆ ทำให้มีความเสถียรของรูปร่าง ลักษณะของเนื้อดินและโครงสร้างของดินจึงมีอิทธิพลต่อความพรุนของดิน การอุ้มน้ำ การระบายน้ำและอากาศ การซบซนของราก ดังนั้นพื้นที่ผิวสัมผัสของเนื้อดินแต่ละชนิดย่อมมีผลต่อการดูดซับโลหะด้วย (ดังรูปที่ 17) โดยดินที่มีพื้นที่ผิวรวมของอนุภาคมากกว่าจะดูดซับไอออน ซึ่งเป็นธาตุอาหารได้มากกว่าด้วย ลักษณะของโครงสร้างดินที่พืชต้องการ คือ ไม่ขัดขวางการเจริญเติบโตของราก มีการถ่ายเทอากาศและการระบายน้ำในดินได้ดี สามารถอุ้มน้ำให้กับพืชได้ มีลักษณะเอื้อประโยชน์ต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช เป็นที่ยึดเกาะของรากได้ดี (Kohnke และ Franzmeier, 1995; ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545)

Bell et al., (2001) รายงานว่า ดินทราย (Sandy Soils) ซึ่งเป็นดินที่มีปริมาณดินเหนียว (Clay) และอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter) ต่ำ พบว่าพืชส่วนใหญ่สามารถดูดตั้งแคดเมียมไปใช้ได้สูงกว่าพืชที่ปลูกในดินเหนียว (Clay Soils)

คุณสมบัติของดิน				ความสามารถในการดูดซับโลหะ						
Texture	S.A.(cm ² /g)	%Fe ₂ O ₃	%Clay	Cu	Pb	Be	Zn	Cd	Ni	Hg
Clay	67	23	52	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="background-color: #cccccc; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ความสามารถในการดูดซับสูง</div> <div style="background-color: #cccccc; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">ความสามารถในการดูดซับปานกลาง</div> <div style="background-color: #cccccc; padding: 5px;">ความสามารถในการดูดซับต่ำ</div> </div>						
Silty Clay	120	5.6	29							
Clay	122	3.7	46							
Sandy Loam	38	1.7	61							
Clay	51	17	61							
Silty Clay	62	4	31							
Loam										
Sand	9	1.8	5							
Sandy Loam	20	1.8	15							
Loamy Sand	8	0.6	4							

รูปที่ 17 ความสามารถของเนื้อดินในการดูดซับโลหะ

ที่มา : WHO, 1992

หมายเหตุ : S.A. หมายถึง พื้นที่ผิวสัมผัส (Surface Area)

6) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

อินทรีย์วัตถุที่มีประจุลบ (Net Negatively Charge) อยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ความสามารถในการดูดซับประจุบวกสูงกว่าคอลอยด์อื่นๆ ประมาณ 2-30 เท่า จึงทำให้ดินที่มีอินทรีย์วัตถุสูง มีความต้านทานการเปลี่ยนแปลง พีเอช ได้ดี (Adriano, 2001) อย่างไรก็ตามอินทรีย์วัตถุมีส่วนที่เป็นประจุบวกอยู่บ้าง ซึ่งความสามารถดังกล่าวช่วยป้องกันไม่ให้โลหะหนักละลายสูญหายไปกับน้ำโดยง่าย แคตไอออนที่เป็นไฮโดรเจนไอออน (H⁺) ถูกอินทรีย์วัตถุดูดซับเอาไว้ ทำให้โอกาสที่ พีเอช จะเปลี่ยนแปลงย่อมเกิดได้ยาก ดังนั้น ถ้าในดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุที่เหมาะสม โอกาสที่โลหะจะออกสู่สารละลายดินก็น้อยลง ซึ่งเป็นผลมาจากความต้านทานการเปลี่ยนแปลง พีเอช (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) นอกจากนี้ อินทรีย์วัตถุยังสามารถทำให้การอุ้มน้ำของดินดีขึ้น (Water Holding Capacity) โดยเฉพาะในดินทราย และยังช่วยเพิ่มการถ่ายเทอากาศและน้ำในดินอีกด้วย

7) ชนิดของพืช

ลักษณะของพืชมีส่วนสำคัญในการกำหนดปริมาณโลหะหนักที่พืชจะดูดตั้ง จุลธาตุ และสะสมในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 10 เช่น กระจับมีมีการเคลื่อนย้ายแคดเมียม ไปที่หัวและยอดเพียงเล็กน้อย ในเนื้อเยื่อของกระจับมีความเข้มข้นของแคดเมียมในปริมาณต่ำ แต่พบในรากมีปริมาณแคดเมียมเพิ่มขึ้น (Jiang et al., 2001; Liu และ Hou, 2001)

ตารางที่ 10 ปริมาณแคดเมียมในพืชชนิดต่างๆที่ปลูกในดินชนิดเดียวกัน

ชนิดพืช	ปริมาณแคดเมียม (mg/kg น้ำหนักแห้ง)
ส่วนใบของคืนฉ่าย	28.80
มันฝรั่ง	1.76
ข้าวบาร์เลย์, ข้าวโพด	0.64
ใบยาสูบ	56.60

ที่มา : Schlipkoter และ Brockhaus (1998) อ้างถึงใน ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (2545)

สำหรับพืชที่จัดว่าเป็น Hyperaccumulator ควรมีความสามารถในการสะสมจุล ธาตุในใบและพืชสามารถเจริญเติบโตได้ ดังนี้ (Kabata-Pendias และ Pendias, 2000)

>100 mg/kg ในแคดเมียม

>1,000 mg/kg ในโคบอลต์ ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว

>10,000 mg/kg ในแมงกานีส สังกะสี

พืชชนิดหนึ่งคือ *Thlaspi Caerulescens* (Apone Pennycress) เป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักไว้ในปริมาณมาก (Hyperaccumulator) สามารถผลิตชีวมวลได้ในช่วง พีเอช มากกว่าที่ พีเอช 4.4 ซึ่งพบปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมสูงสุดในพืชคือ 236 mg/kg (Yanai, Zhao, McGrath, & Kosaki, 2006) นอกจากนี้ ยังสามารถสะสมสังกะสีและ ตะกั่วในปริมาณที่สูง คิดเป็น 3% และ 0.8% ตามลำดับ (Alloway, 1995)

8) สภาพแวดล้อมอื่น

8.1) อุณหภูมิ (temperature) อุณหภูมิมีผลต่อพืชมาก เนื่องจากเมื่อ อุณหภูมิสูงขึ้นจะพบว่าพืชจะดูดตั้ง Cd, Zn, Mn และ Fe จากดินสู่พืชมากขึ้น

8.2) ช่วงวัน (day length) ช่วงวันก็มีผลต่อการดูดตั้งโลหะหนักของพืชเช่นกัน โดยที่ช่วงวันมากขึ้นพืชก็จะมีโอกาสในการสังเคราะห์แสงมากขึ้น ทำให้โอกาสที่พืชจะดูดตั้งเอาโลหะหนักออกจากดินนั้นมีสูงขึ้นด้วย

8.3) ความเข้มแสง (intensity) ปริมาณของแสงก็มีส่วนในการดูดตั้งโลหะหนักของพืชเช่นกัน เนื่องจากแสงที่มีความเข้มพอเหมาะพืชก็จะสามารถสังเคราะห์แสงได้ดี ทำให้การดูดตั้งโลหะหนักที่อยู่ในดินก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

8.4) ความชื้นในดิน (soil moisture) ความชื้นของดินก็มีส่วนที่พืชจะดูดตั้งโลหะหนักไปจากดิน โดยจะพิจารณาจากการ osmosis ซึ่งต้องมีความเหมาะสมของความชื้นในดิน พืชจึงจะดูดตั้งสารต่าง ๆ ออกจากดินได้

8.5) ความชื้นในอากาศ (air humidity) ก็มีผลต่อการดูดตั้งโลหะหนักในดินเช่นกัน เนื่องจากความชื้นในอากาศมีผลต่อการคายน้ำของพืช ถ้าพืชคายน้ำออกมาได้น้อย แรงดึงที่รากก็จะต่ำ ทำให้พืชดูดตั้งสารต่าง ๆ ในดินได้น้อยลงเช่นกัน

2.8 ประสิทธิภาพของกระบวนการเคลื่อนย้ายโลหะหนักสู่พืช

พืชที่จัดว่ามีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้าย โลหะเข้ามาสะสมในส่วนต่าง ๆ ของต้นพืชได้ดี (hyperaccumulator) จะต้องสามารถเคลื่อนย้าย โลหะเข้ามาสะสมได้ไม่น้อยกว่า 1,000 mg/kg (อลิสซา วังโน, 2553) โดยประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายโลหะนั้นจะ พิจารณาจากค่า bioconcentration factor (BCF) และค่า translocation factor (TF) ซึ่งคำนวณจากสูตร

$$TF = \frac{C_{shoot}}{C_{root}}$$

$$BCF = \frac{C_{root}}{C_{soil}}$$

C_{shoot} คือ ปริมาณโลหะหนักจากส่วนเหนือดินของพืช (mg/kg DW)

C_{root} คือ ปริมาณโลหะหนักจากส่วนใต้ดินของพืช (mg/kg DW)

C_{soil} คือ ปริมาณโลหะหนักในดิน (mg/kg DW)

หากพืชที่วิเคราะห์มีค่า TF และ BCF มากกว่า 1 จะจำแนกพืชนั้นว่าเป็น metal hyperaccumulator และ หากมีค่าน้อยกว่า 1 และมีปริมาณโลหะหนักในรากสูง จะจำแนกพืชนั้นว่าเป็น metal excluder ส่วนพืชที่เป็น metal indicator จะต้องมีความเข้มข้นโลหะหนักที่สะสมในส่วน

เหนื่อดินของพีช แปรผันตามปริมาณโลหะในดินที่ตำแหน่งนั้นๆ (Upatham, E.S.และคณะ, 2015 และ Baker, A.J.M. และ Brooks, R.R., 1989)

2.9 การปนเปื้อนของแคดเมียมที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

สืบเนื่องจากการเกิดโรคอิตะ-อิตะ (Itai Itai Disease) ในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีการค้นพบว่าสาเหตุมาจากการบริโภคข้าวที่ปนเปื้อนสารแคดเมียม เป็นเวลา 30 ปีขึ้นไป นำมาสู่การค้นพบการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินและพืชผลทางการเกษตร โดยเฉพาะข้าว นักวิจัยต่างชาติ Dr. Robert W. Simmons จากสถาบันจัดการคุณภาพน้ำ (International Water Management Institute - IWMI) จึงได้ร่วมกับนักวิชาการจากกรมวิชาการเกษตร (Department of Agriculture : DOA) ภายใต้โครงการความร่วมมือ IWMI - DOA Collaborative Project 1998-2003 ทำการตรวจวัดระดับสารแคดเมียม ในดิน และข้าวบริเวณอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก จำนวนประมาณ 13,750 ไร่ รวมทั้งศึกษาแหล่งกำเนิดของสารแคดเมียม ระหว่างปี พ.ศ. 2541-2546

ผลการศึกษาช่วงแรกระหว่างปี พ.ศ.2541-2543 ในแปลงนาบริเวณบ้านพะเต๊ะ ตำบลพระธาตุผาแดง ซึ่งอยู่ใกล้บริเวณแหล่งแร่สังกะสี ของอำเภอแม่สอด พบว่า มีปริมาณสารแคดเมียมในดิน (154 ตัวอย่าง) จำนวน 3.4-287 mg/kg ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานของสหภาพยุโรป (EU) กำหนดไว้ไม่เกิน 3 mg/kg และพบว่า ร้อยละ 90 ของข้าวที่สุ่มตรวจ มีปริมาณแคดเมียม 0.1-4.4 mg/kg ซึ่งเปรียบเทียบกับบริเวณข้าวที่ปลูกในบริเวณอื่น มีปริมาณแคดเมียมเพียง 0.043 mg/kg ซึ่งปริมาณสารแคดเมียมที่พบนี้มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับข้าวที่ก่อให้เกิดโรคอิตะ-อิตะ ในประเทศญี่ปุ่น หากบริโภคติดต่อกันเป็นเวลานาน

ผลการศึกษาช่วงที่สอง (ปี พ.ศ.2544-2546) ได้ขยายพื้นที่ศึกษาจากช่วงแรกมาตามลำห้วยบริเวณตำบลพระธาตุผาแดง และตำบลแม่ตาว พบปริมาณแคดเมียมในดินมาก สูงกว่าค่ามาตรฐานของสหภาพยุโรป (EU) ถึง 72 เท่า (0.46-218 mg/kg) (Simmons et al., 2005)

สำหรับผลการศึกษาถึงแหล่งกำเนิดของสารแคดเมียม นักวิจัยสรุปว่า น่าจะเกิดจากการที่ฝนตกชะหน้าดิน ที่อุดมด้วยแร่สังกะสี และแคดเมียม ลงสู่ต้นน้ำของลำน้ำธรรมชาติ ซึ่งก็คือ ห้วยแม่ตาว ในกรณีนี้ ทำให้เกิดการสะสมในตะกอนท้องน้ำ เมื่อปล่อยน้ำเข้าสู่ในแปลงนา ตะกอนจะตกในแปลงต้นน้ำ และลดลงในแปลงต่อไป อย่างไรก็ตาม นักวิจัยสรุปว่า ไม่มีหลักฐานเพียงพอ ที่จะกล่าวว่า สารแคดเมียมมาจากเหมืองสังกะสี ที่เปิดทำการอยู่ในบริเวณที่พบการปนเปื้อนนี้ (คณินิจ นิชานนท์ และ ฉันทนา ผดุงทศ, 2548)

พิชิต พงษ์สกุล และ สุรสิทธิ์ อรรถจารุสิทธิ์ (2542) พบว่า การแพร่กระจายของแคดเมียม และสังกะสีในตัวอย่างดินบริเวณที่ได้รับน้ำชลประทานจากห้วยแม่ตาวติดกับคลองส่งน้ำเข้าแปลงปลูกข้าว มีความเข้มข้นของสังกะสีและแคดเมียมสูงกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไป ซึ่งทำให้ชาวบ้านและ

นักวิชาการหลายท่านตั้งสมมุติฐานว่า ในอดีตลำน้ำในห้วยแม่ดาวอาจมีแคดเมียมและสังกะสีปนเปื้อนอยู่ ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีใครสามารถชี้แจงถึงสาเหตุของการปนเปื้อนดังกล่าวอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การหาแนวทางป้องกัน และแก้ไขปัญหามลพิษการปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่การเกษตรดังกล่าวเป็นไปได้ยาก

ใน พ.ศ. 2546 เจ้าหน้าที่จากกรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข ร่วมกับโรงพยาบาลแม่สอด จังหวัดตาก ได้เริ่มทำการสำรวจเพื่อติดตามสถานการณ์ 100,000 คนที่อาศัยอยู่ในชุมชนที่ได้รับผลกระทบจากแคดเมียม ด้วยการใช้ข้อมูลแผนที่ทางภูมิศาสตร์ (GIS), แผนที่พื้นที่นาข้าวที่ได้รับการปนเปื้อนที่ยังมีผู้บริโภคอยู่ ในปี 2547 ประชากรที่ได้รับผลกระทบจะถูกจัดจำแนกเป็นกลุ่มตามสถานะการได้รับแคดเมียม นักพิษวิทยาจากคณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และผู้เชี่ยวชาญทางด้านแคดเมียมชาวญี่ปุ่นจากมหาวิทยาลัยทางการแพทย์ Kanazawa ได้ร่วมกันวิจัยผลกระทบของแคดเมียมต่อไต และอวัยวะเป้าหมายหลักของแคดเมียม ซึ่งคาดการณ์ว่าจำเป็นต้องมีการติดตามสถานการณ์ไปอีกในระยะเวลา 10 ปี เพื่อลดความเสี่ยงทางด้านสุขภาพของประชากร 800 คน ที่ตรวจพบแคดเมียมในปัสสาวะในระดับที่สูง ($> 5\mu\text{g/g creatinine}$) และอยู่ในระดับที่มีความเสี่ยงของเกิดโรคไตวายได้ (Chantana, P. et al., 2012) (Chantana, Wittaya, Nishijo, Werawan, & Thawangon, 2012)

Chanthachot และคณะ (2005) ศึกษาโลหะหนัก คือ สารหนู แมงกานีส แคดเมียม สแกนเดียม ทอเรียม โครเมียม สังกะสี โคบอลต์ ซีเรียม และเหล็กในดินบริเวณแม่น้ำแม่ดาว จังหวัดตาก อธิบายโดยใช้ Instrumental Neutron Activation Analysis เก็บตัวอย่างจาก 12 พื้นที่ระหว่าง 15-19 พฤศจิกายน 2004 พบว่า สารหนู แคดเมียม โครเมียม โคบอลต์ ทอเรียม สแกนเดียม และซีเรียม อยู่ในช่วง 4-92 ไมโครกรัมต่อกรัม ส่วนแมงกานีส อยู่ในช่วง 100-1,052 $\mu\text{g/g}$ สังกะสีอยู่ในช่วง <25 -1,652 $\mu\text{g/g}$ และเหล็กอยู่ในช่วง 10,300-25,100 $\mu\text{g/g}$ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของแคดเมียม สังกะสีและสารหนูสูงกว่าระดับค่ามาตรฐานสูงสุดที่ยอมรับได้ของ EU ของดินที่ทำการเกษตร

ประยูรท์ สมบูรณ์ (2542) ศึกษาเกี่ยวกับการกระจายตัวของแคดเมียมและสังกะสีในดินจากกิจกรรมทำเหมืองสังกะสี: กรณีศึกษาเหมืองสังกะสี อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก การทำเหมืองสังกะสีทำให้เกิดแคดเมียมและสังกะสีกระจายในบริเวณลุ่มน้ำ โดยเฉพาะพื้นที่ที่อยู่ท้ายน้ำ จากผลการศึกษาจะมี 2 ทางเลือกในการจัดการปัญหาดินปนเปื้อนคือ 1) การจัดการพื้นที่และน้ำที่เกิดจากกิจกรรมของการทำเหมือง โดยการควบคุมโครงสร้าง มีการกักเก็บและตรวจสอบพื้นที่ไม่ให้เกิดการชะลามาเมื่อเกิดฝนตก 2) การบำบัดดินที่ปนเปื้อน ในพื้นที่ไม่ได้ทำการเพาะปลูกทำได้โดยเพิ่มพีเอชในดิน ส่วนในพื้นที่เพาะปลูกควรมีการเติมอินทรีย์วัตถุเพื่อลดการละลายของแคดเมียมและสังกะสีหรือไม่ควรเพาะปลูกพืชที่กินได้

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. X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)
5. Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)
6. Brunauer-Emmett-Teller (BET)
7. ตู้อบ (Oven)
8. ตู้ดูดควัน (Hood)
9. โถดูดความชื้น (Desiccater)
10. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
11. เครื่องชั่งละเอียด (4 ตำแหน่ง)
12. เตาแผ่นความร้อน (Hot plate)
13. เครื่องบดอย่างหยาบ (Wood chopper)
14. เครื่องเขย่า (Shaker)
15. กระดาษกรอง (Whatman no. 42)
16. ตะแกรงร่อนขนาด 325 เมช , 2 มิลลิเมตร และ 0.5 มิลลิเมตร
17. เครื่องแก้ว
 - 17.1 ปีกเกอร์
 - 17.2 กระจกตวง
 - 17.3 ขวดรูปชมพู่
 - 17.4 ขวดแก้ววัดปริมาตร
 - 17.5 หน้าปัดนาฬิกา
 - 17.6 ปีเปต

3.1.2 สารเคมี

1. แคดเมียมไนเตรท ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
2. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
3. กรดไนตริก (HNO_3)
4. กรดเปอร์คลอริก
4. สารละลายมาตรฐานแคดเมียม

3.1.3 วัสดุอุปกรณ์สำหรับการทดลองในโรงเรียน

1. เมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105
2. กระจกคลุมชุด
3. ดินปนเปื้อน บริเวณบ้านพะโต๊ะ ต.พระธาตุผาแดง อําเภอมแม่สอด จังหวัดตาก
4. กระจกพลาสติก (กว้าง 12 นิ้ว ลึก 9 นิ้ว)
5. กรรไกร
6. มีด
7. พลับ
8. ถังมือ
9. ตลับเมตร

3.2 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

3.2.1 ห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

- เตรียมผงกระจกคลุม
- ศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับของผงกระจกคลุม

3.2.2 โรงเรียนโปรงแสง พื้นที่ อําเภออาจสามารถ จังหวัดร้อยเอ็ด

- เตรียมดิน
- เตรียมเพาะกล้าพันธุ์ข้าว
- ทำการปลูกข้าวในกระจกทดลอง

3.2.3 ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ศึกษาลักษณะพื้นผิวและโพรงด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ; TEOL JSM-6400
- ศึกษาปริมาณธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) ; Bruker Model S8 Tiger
- การหาหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปด้วยเครื่อง Fourier Transforms Infrared Spectrometer (FTIR) ; Perkin Elmer Spectrum ASCII PEDS 4.00

3.2.4 วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรทั้งหมดของโพรงและขนาดโพรงด้วยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller (BET) ; Quantachrome model : AS-1

3.2.5 ศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

- หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ; Perkin Elmer model AAnalyst 200

3.3 ขั้นตอนงานวิจัย

ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย แบ่งออกเป็นสองส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของผงกระดูกหมูและศึกษาประสิทธิภาพของผงกระดูกหมูในการกำจัดแคดเมียมออกจากสารละลาย

ส่วนที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพของผงกระดูกหมูในการยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมของข้าวดอกมะลิ 105

3.3.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของผงกระดูกหมูและศึกษาประสิทธิภาพของผงกระดูกหมูในการกำจัดแคดเมียมออกจากสารละลาย

3.3.1.1 การเตรียมกระดูกหมู

นำกระดูกหมูสด (ส่วนขาหน้า) ไปต้มที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3, 6, 9 ชั่วโมง รวมทั้งสิ้น 9 ชุดการทดลอง ได้แก่ SB60-3, SB60-6, SB60-9, SB80-3, SB80-6, SB80-9, SB100-3, SB100-6, SB100-9 จากนั้นนำมาล้างทำความสะอาด กำจัดไขมันออกให้หมด และกำจัดกลิ่นด้วยน้ำเกลือ เมื่อล้างสะอาดแล้วนำไปผึ่งแดดเป็นเวลา 2 สัปดาห์ แล้วนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จะได้กระดูกหมูเพื่อใช้ในการเตรียมเป็นผงกระดูกหมูต่อไป

3.3.1.2 การเตรียมผงกระดูกหมู

นำกระดูกหมูที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.1 มาบดด้วยครกหิน จะได้กระดูกที่มีขนาดเล็กกลง จากนั้นบดละเอียดด้วยเครื่องบด นำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช หรือ 150 ไมโครเมตรแล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น จะได้ผงกระดูกหมูที่สามารถใช้ในการทดลองดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 ขั้นตอนการเตรียมกระดูกหมูและผงกระดูกหมู

3.3.1.3 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของผงกระดูก

ลักษณะทางกายภาพของกระดูกหมู ได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของโพรง และปริมาตรทั้งหมดของโพรง โครงสร้างผลึก สมบัติทางเคมี ได้แก่ องค์ประกอบของสารอินทรีย์ วิธีวิเคราะห์สมบัติต่างๆ แสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 วิธีวิเคราะห์สมบัติต่างๆของกระดูกหมู

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

3.3.1.4 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของผงกระดูกหมู

1) การเตรียมสารละลายแคดเมียม

นำสารละลายมาตรฐานแคดเมียมในเตรทที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมเป็น 1,000 mg/L เจือจางให้เป็น 100 mg/L โดยใช้สารละลายมาตรฐาน 100 มิลลิลิตรผสมกับกรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวม 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายแคดเมียมเข้มข้น 100 mg/L นำไปเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งได้ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมเป็น 10 mg/L

2) การทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมของผงกระดูกหมู

2.1. การทดลองหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของผงกระดูกหมูในการกำจัดแคดเมียม

ชั่งผงกระดูกหมูปริมาณ 0.02 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร ใส่ น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่พีเอช 6 เขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำในแต่ละช่วงเวลาคือ

30 นาที 1, 1.30, 3, 5 และ 24 ชั่วโมง นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman no. 42 (0.45 ไมครอน) จากนั้นนำไปหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง AAS

2.2. ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมกับประสิทธิภาพการกำจัดของผงกระดูกหมู

ใช้สารละลายแคดเมียมเข้มข้น 10, 20, 30 และ 40 mg/L ใช้ปริมาณผงกระดูกหมู 0.02 กรัม ที่พีเอช 6 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมล หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมล จากนั้นนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาที ในเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 2.1 จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman no. 42 (0.45 ไมครอน) รักษาสภาพความเป็นกรดให้มีค่าพีเอชน้อยกว่า 2 ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น จากนั้นนำไปวัดค่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง AAS

2.3. การศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับสารละลายแคดเมียม

ใช้ผงกระดูกหมูปริมาณ 0.02, 0.05, 0.10, 0.50, 0.80 และ 1.20 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมที่เหมาะสมจากข้อ 2.2 ที่พีเอช 6 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 โมล หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมล จากนั้นนำไปเขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาทีในเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 2.1 นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman no. 42 (0.45 ไมครอน) รักษาสภาพความเป็นกรดให้มีค่าพีเอชน้อยกว่า 2 ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น จากนั้นนำไปหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง AAS

ประสิทธิภาพของผงกระดูกหมูในการกำจัดแคดเมียม (ร้อยละในการกำจัดแคดเมียม) และประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดแคดเมียมต่อน้ำหนัก 1 กรัม (Qe) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ (Tangjuank *et al.* 2009)

$$\text{ร้อยละในการกำจัดแคดเมียม} = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100 \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\text{ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด (Qe)} = \frac{C_i - C_e}{W} \times V \dots\dots\dots(3.2)$$

เมื่อ C_i and C_e คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียม (มก/ล.) และความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือหลังจากการทดลอง (มก/ล.) ตามลำดับ. V คือ ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร) W คือ น้ำหนักแห้งของผงกระดูกหมู (กรัม)

3.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพของผงกระดุกหมูในการยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมของข้าว ขาวดอกมะลิ 105

3.3.2.1 การเตรียมดิน

ดินที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้แบ่งเป็น 2 ชุด ได้แก่ ดินไม่ปนเปื้อน (RE0) ซึ่งเป็นดินบริเวณที่นาบ้านหว่านไฟ ตำบลบ้านคู้ อำเภอบางบาล จังหวัดร้อยเอ็ด ส่วนดินปนเปื้อน (TK) เป็นดินปนเปื้อนแคดเมียมจากพื้นที่ทำการเกษตร บริเวณบ้านพะเต๊ะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก พิกัดทางภูมิศาสตร์ N 16.668332, E 98.606766 ดินทั้ง 2 ชุด ทำการเก็บแบบสุ่มที่ระดับความลึก 0-15 ซม. ผึ่งดินให้แห้ง ทบดินและเก็บรากพืชที่ติดมาออกแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร สุ่มเก็บตัวอย่างดินบางส่วนไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสมบัติทางเคมีและกายภาพก่อนทำการทดลอง ดังตารางที่ 12

3.3.2.2 การเตรียมดินสำหรับการทดลองในโรงเรือน

ดินในแต่ละกระถาง (ใช้ดิน 5 กิโลกรัมต่อกระถาง) ถูกผสมด้วยผงกระดุกหมู ในอัตราส่วนต่างๆโดยคิดสัดส่วนกระดุกหมูต่อน้ำหนักดินในกระถาง 5 กิโลกรัม แบ่งชุดการทดลองออกเป็น 5 ชุดการทดลองดังนี้

- 1) ดินไม่ปนเปื้อนและไม่ใส่ผงกระดุกหมู (RE0)
- 2) ดินปนเปื้อนและไม่ใส่ผงกระดุกหมู (TK0)
- 3) ดินปนเปื้อนและใส่ผงกระดุกหมู 5% (TK5)
- 4) ดินปนเปื้อนและใส่ผงกระดุกหมู 10% (TK10)
- 5) ดินปนเปื้อนและใส่ผงกระดุกหมู 15% (TK15)

ดินแต่ละกระถางคลุกเคล้าด้วยผงกระดุกจนเป็นเนื้อเดียวกัน นำดินที่ผสมผงกระดุกแล้วแต่ละกระถางไปวางในโรงเรือนทดลอง โดยเป็นการวางแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomize Design) จากนั้นเติมปุ๋ย NPK สูตร 15-15-15 ในอัตราส่วน 0.27 กรัมต่อกิโลกรัมดิน หรือ 20 กิโลกรัมต่อไร่ ก่อนทำการปลูกพืช 1 วัน และก่อนข้าวออกดอก 30 วัน (สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2555) ป่มดินไว้เป็นเวลา 30 วัน หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการปักดำต้นกล้าที่เพาะเตรียมไว้แล้ว

3.3.2.3 การเตรียมเพาะกล้าพันธุ์ข้าว

เมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L. var Khao Dawk Mali 105) ได้จากศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าว จังหวัดร้อยเอ็ด คัดเลือกเมล็ดพันธุ์ที่มีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกันมากที่สุด เมล็ดสมบูรณ์ไม่มีรอยแหว่งหรือถูกกัดกิน เพื่อให้ได้ต้นกล้าที่แข็งแรงและมีขนาดเท่ากันมากที่สุด สุ่มเก็บตัวอย่างบางส่วนไปวิเคราะห์หาแคดเมียมก่อนทำการทดลอง หลังจากนั้นทำการ

เพาะเมล็ดพันธุ์ข้าวใส่กระบะหลุมสำหรับเพาะต้นกล้า ใช้เวลาประมาณ 3 สัปดาห์ และย้ายต้นกล้ามาปลูกลงในกระถางที่เตรียมไว้ในข้อ 3.3.2.2 โดยปลูก 2 ต้นต่อ 1 กระถาง

3.3.2.4 การศึกษาการเจริญเติบโตของพืช

ทำการวัดความสูงของพืชทุกๆ 7 วัน ตั้งแต่เริ่มทำการทดลองจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง ใช้เวลาทั้งสิ้น 14 สัปดาห์ เมื่อข้าวออกรวงเก็บตัวอย่างพืชในแต่ละตำรับการทดลองตามช่วงระยะเวลาการเจริญเติบโตของพืชดังนี้ ระยะแตกกอ (6 สัปดาห์) ระยะออกดอก (10 สัปดาห์) และ ระยะเก็บเกี่ยว (14 สัปดาห์) พืชที่เก็บเกี่ยวแล้วจะถูกนำไปล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นล้างน้ำสุดท้ายด้วยน้ำกลั่น วัดความยาวรากและความสูงของต้น นำพืชแต่ละต้นมาทำการแยกส่วนออกเป็น ลำต้น (ใบและลำต้น), ราก, เมล็ด และเปลือก และทำการชั่งน้ำหนักสดของส่วนต่างๆของต้นข้าว นำส่วนต่างๆของพืชไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน หรือจนน้ำหนักคงที่ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักแห้งหลังอบ

ตารางที่ 12 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินปนเปื้อนแคดเมียม

พารามิเตอร์	วิธีการ	อ้างอิง
พีเอช	พีเอช meter (soil : water; 1:2)	(DOA, 2010)
เนื้อดิน	Hydrometer	(DOA, 2010)
ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	Ammonium acetate (NH ₄ OA _c)	(DOA, 2010)
อินทรีย์วัตถุ	Walkey-Black rapid titration	(DOA, 2010)
Total Nitrogen	Kjeldahl digestion	(USEPA, 1993)
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์	Bray II (NH ₄ F 0.03N+HCl 0.10 N)	(DOA, 2010)
โปรแตสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้	1N CH ₃ COONH ₄ ; AAS	(DOA, 2010)
แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้	1N CH ₃ COONH ₄ ; AAS	(DOA, 2010)
แมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้	1N CH ₃ COONH ₄ ; AAS	(DOA, 2010)
แคดเมียมในรูปที่พืชดูดตั้งได้	1N CH ₃ COONH ₄ ; AAS	(DOA, 2010)
สังกะสีในรูปที่พืชดูดตั้งได้	1N CH ₃ COONH ₄ ; AAS	(DOA, 2010)
แคดเมียมทั้งหมด	HNO ₃ , 30 % H ₂ O ₂ and HCL Digestion	(US EPA, 1996)
สังกะสีทั้งหมด	HNO ₃ , 30 % H ₂ O ₂ and HCL Digestion	(US EPA, 1996)

3.3.2.5 การศึกษาหาความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีในตัวอย่าง

1) การศึกษาหาความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในพืช

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างพืช ซึ่งตัวอย่างพืชที่บดแล้ว 1 กรัมมาย่อยด้วย hot plate โดยใช้ $\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4$ อัตราส่วน 4:1 ปริมาณ 20 ml จนกระทั่งได้สารละลายใสไม่มีสี กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

2) การศึกษาหาความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในดินหลังการ

ทดลอง

ดินภายหลังเก็บเกี่ยวพืชแล้วนำมาคลุกเคล้าให้เข้ากัน นำมาบด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ซึ่งตัวอย่างดิน 1 กรัม ไปย่อยด้วย hot plate โดยใช้ $\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4 : \text{H}_2\text{SO}_4$ อัตราส่วน 5:2:1 ปริมาณ 20 ml กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดหาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

3) การศึกษาหาความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูด

ดึงได้ในดินหลังการทดลอง

ดินภายหลังเก็บเกี่ยวพืชแล้วนำมาคลุกเคล้าให้เข้ากัน นำมาบด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ซึ่งตัวอย่างดิน 1 กรัม นำไปสกัดด้วย 0.005 M Diethylenetriamine pentaacetic acid (DTPA) ในอัตราส่วน 1:2 (w/v) กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5 แล้วนำไปวัดหาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

3.3.2.6 การศึกษาหาประสิทธิภาพของกระบวนการเคลื่อนย้ายแคดเมียมและสังกะสี

สู่พืช

ประสิทธิภาพของกระบวนการเคลื่อนย้ายแคดเมียมและสังกะสีสู่พืช พิจารณาจากค่า biological translocation factor (BCF) และ translocation factor (TF) BCF คือ สัดส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีในรากพืชต่อความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีในดิน ดังแสดงในสมการที่ (3.3) และ TF คืออัตราส่วนของความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีในลำต้นต่อความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีในรากพืช ดังแสดงในสมการที่ (3.4) (Bech และคณะ. 2012; Malik และคณะ. 2010; Yoon และคณะ. 2006)

$$BCF = \frac{\text{โลหะหนักที่สะสมในรากพืช}}{\text{โลหะหนักที่สะสมในดิน}} \dots\dots\dots(3.3)$$

$$TF = \frac{\text{โลหะหนักที่สะสมในลำต้น}}{\text{โลหะหนักที่สะสมในรากพืช}} \dots\dots\dots(3.4)$$

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.4.1. การเจริญเติบโตของพืช

พิจารณาจากความสูง ตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดการทดลอง แล้วหาน้ำหนักแห้งภายหลังการเก็บเกี่ยว

3.4.2. ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในพืช

คำนวณจากปริมาณโลหะหนักในส่วนต่างๆของพืช (mg) ต่อน้ำหนักแห้ง (kg) ดังสมการที่ 3.5

$$\text{แคดเมียมที่สะสมในส่วนต่างๆของพืช (mg/kg)} = \frac{\text{ปริมาณแคดเมียมในส่วนต่างๆของพืช (mg)}}{\text{น้ำหนักแห้ง (kg)}} \dots\dots\dots(3.5)$$

3.4.3 ปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดออกจากดิน

ปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดออกจากดิน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ หาได้ดังสมการที่ 3.6

$$\% \text{ แคดเมียมในพืช} = \frac{\text{ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในพืช (mg)}}{\text{ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในกระถาง (mg)}} \times 100 \dots\dots\dots(3.6)$$

3.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

รวบรวมผลการทดลองและนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลของผงกระดูกหมูต่อความสูง ผลของผงกระดูกหมูต่อผลผลิตข้าว ความแตกต่างของการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของต้นข้าว ในอัตราส่วนของผงกระดูกหมูที่ต่างกัน มาวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ย (ANOVA) ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 หรือไม่ ถ้าแตกต่างกันจะทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลใดที่แตกต่างไปจากกลุ่มอื่นโดยวิธีของ Duncan's new multiple range test (DMRT)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ 1) ศึกษาถึงประสิทธิภาพของผงกระดูกหมูในการกำจัดแคดเมียมออกจากสารละลาย และ 2) ประสิทธิภาพของผงกระดูกหมูที่เติมลงไปในดินในการยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยการศึกษาในโรงเรือนทดลอง

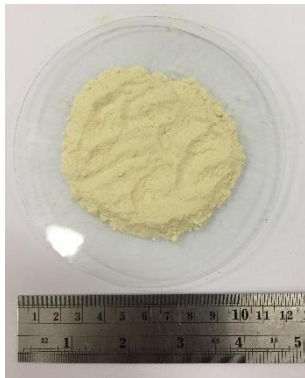
4.1 ส่วนที่ 1 : การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผงกระดูกหมู

4.1.1 การเตรียมผงกระดูกหมู

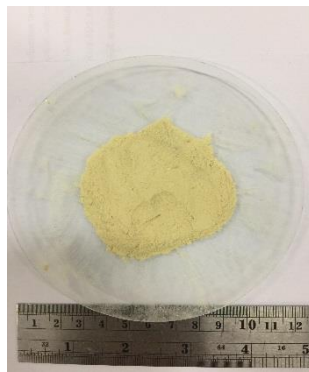
เตรียมสารดูดซับจากกระดูกหมูสด โดยนำกระดูกหมูสดไปต้มที่อุณหภูมิ 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3, 6 และ 9 ชั่วโมง จากนั้นนำมาล้างทำความสะอาด กำจัดไขมัน เส้นเอ็นและส่วนที่ไม่ต้องการออก กำจัดกลิ่นด้วยน้ำเกลือ แล้วนำไปผึ่งแดดเป็นเวลา 2 สัปดาห์ เพื่อให้กระดูกหมูแห้งและอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง (รูปที่ 19) นำมาบดละเอียดด้วยเครื่องปั่นและนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช หรือ 175 ไมโครเมตร ผงกระดูกหมูที่เตรียมได้จะมีคริมจนถึงสีขาว (รูปที่ 20) แล้วเก็บไว้ในถุงปิดผนึกอย่างดีเพื่อกันสัตรีบกววน



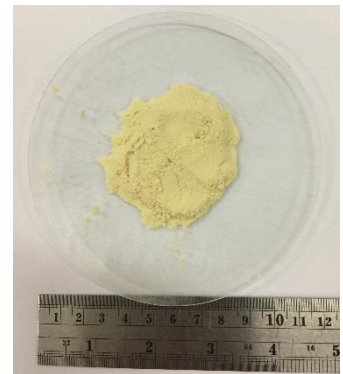
รูปที่ 19 กระดูกหมูที่ผ่านการเตรียมเบื้องต้น



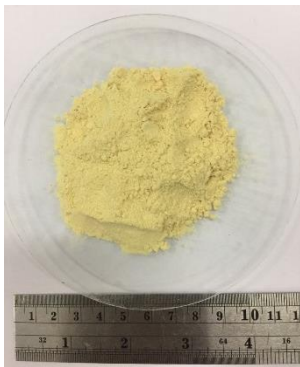
ก



ข



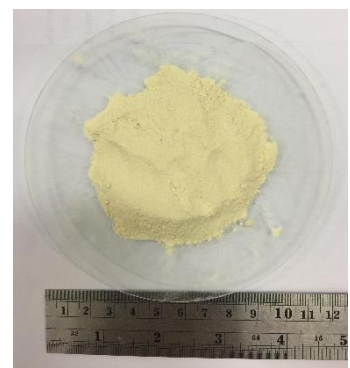
ค



ง



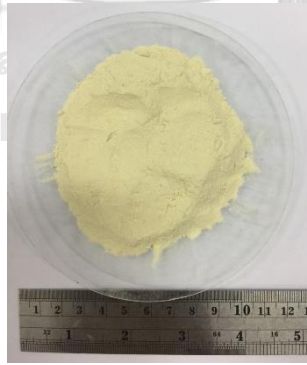
จ



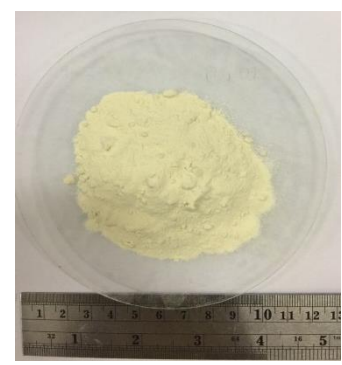
ฉ



ช



ซ



ณ

รูปที่ 20 ผงกระดูกหมูที่ได้จากการเตรียมในสภาวะต่างๆ เพื่อใช้เป็นสารดูดซับ
 (ก) SB60-3 (ข) SB60-6 (ค) SB60-9 (ง) SB80-3 (จ) SB80-6 (ฉ) SB80-9
 (ช) SB100-3 (ซ) SB100-6 (ณ) 100-9

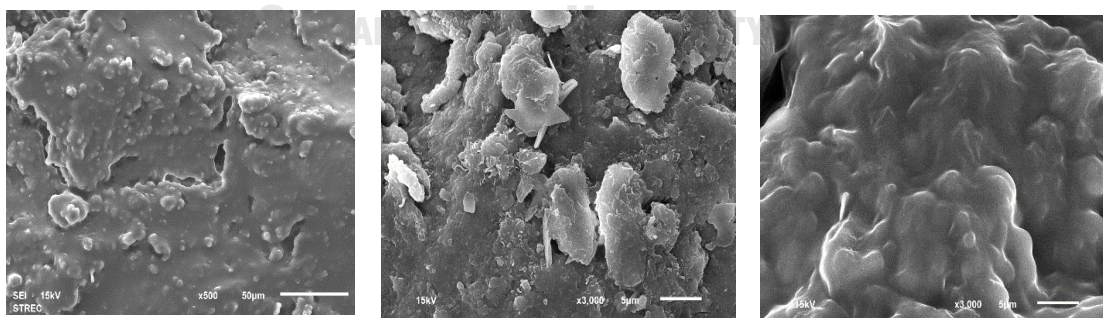
4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของผงกระดูกหมู

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

1) การศึกษาลักษณะพื้นผิวของผงกระดูกด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

นำกระดูกหมูสด ผงกระดูกหมูต้มที่อุณหภูมิ 80 °C นาน 1 ชั่วโมงที่ผ่านการเตรียมแล้ว ก่อนการดูดซับแคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6 และผงกระดูกหมูที่หลังการดูดซับแคดเมียม ไปทำเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ และเคลือบทองทำให้มีสมบัตินำไฟฟ้า เมื่อนำไปสแกนด้วยกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป กำลังขยาย 3,000 เท่า พบว่ากระดูกหมูสดมีลักษณะพื้นผิวเป็นลักษณะแผ่นๆค่อนข้างเรียบ ไม่มีรูพรุน (รูปที่ 4.3) เมื่อเปรียบเทียบกับกระดูกที่ผ่านการต้มแล้วจะพบว่ามีความแตกต่างกัน กล่าวคือกระดูกที่ผ่านการต้มแล้วจะมีลักษณะเป็นชั้นๆ ขรุขระและมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ซึ่งสรุปได้ว่า การต้มมีส่วนทำให้ลักษณะทางกายภาพของกระดูกเปลี่ยนแปลงไป โดยจะเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ในส่วนของกระดูกที่ผ่านการดูดซับแคดเมียมแล้ว พบว่ามีลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปโดยมีลักษณะคล้ายสารบางอย่างเคลือบอยู่บนพื้นผิวของกระดูก เป็นไปได้ว่าเกิดจากสารละลายแคดเมียมที่ผงกระดูกดูดติดไว้ที่ผิว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 21 ลักษณะพื้นผิวของผงกระดูกหมู กำลังขยาย 3,000 เท่า

(ก) ผงกระดูกหมูสด (ข) ผงกระดูกหมูต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง

(ค) ผงกระดูกหมูที่ผ่านการดูดซับแคดเมียมที่ความเข้มข้น 10 mg/L พีเอช 6

2) การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller (BET)

ทำการหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรทั้งหมดของโพรงและขนาดโพรงของผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง Brunauer-Emmett-Teller (BET) ได้ผลดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรทั้งหมดของโพรงและขนาดโพรงของผงกระดูกหมู

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์	
	กระดูกสด	กระดูกต้ม (80 °C 6 ชั่วโมง)
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	0.86	3.49
ขนาดโพรง (Å)	43.65	122.9
ปริมาตรโพรงทั้งหมด (cm ³ /g)	0.0009	0.0107

จากผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิในการต้มส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของผงกระดูกหมู เมื่อเปรียบเทียบผลของผลกระดูกหมูสดและกระดูกหมูที่ผ่านการต้มพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดเพิ่มขึ้นจาก 0.86 m²/g เป็น 3.49 m²/g ปริมาตรทั้งหมดของโพรงเพิ่มขึ้นจาก 0.0009 cm³/g เป็น 0.0107 cm³/g และผงกระดูกหมูที่ผ่านการต้มจะมีขนาดโพรงเฉลี่ยสูงกว่าผงกระดูกหมูสด 2.8 เท่า (จาก 43.65 Å เป็น 122.9 Å) สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุดารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์ (2551) พบว่ากระดูกที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง มีขนาดโพรงเฉลี่ยสูงกว่ากระดูกที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง 1.02 เท่า (จาก 84.37 Å เป็น 86.39 Å) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิในการต้มที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของสารดูดซับเนื่องจากความร้อนจะไปทำลายสารประกอบอินทรีย์ที่ติดอยู่บนผิวของสารดูดซับและทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น (Azargohar and Dalai, 2008) (ตารางที่ 14)

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของผงกระดูกชนิดต่างๆ

ชนิดของสารดูดซับ	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m ² /g)	ปริมาตรทั้งหมด ของโพรง (cm ³ /g)	ขนาดของ โพรง (Å)	อ้างอิง
ผงกระดูกหมูต้ม 4 ชั่วโมง	3.245	0.0188	116.20	วรรณวิมล ธรรมมิกะ (2552)
กระดูกหมูเผา 350 °C 1 ชม.	35.08	0.0740	84.37	สุดารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์ (2551)
กระดูกหมูเผา 400 °C 1 ชม.	117.51	0.2538	86.39	
กระดูกโค-กระดูกเป็ด 400 °C 1 ชม.	88.08	0.3691	298.98	จักรพงษ์ แสน ชัย (2548)
กระดูกโค-กระดูกเป็ด 400 °C 1 ชม.	120.01	0.3625	120.83	ศุภกิช พัฒนาเต ชะ (2545)
ผงกระดูกหมูต้ม 80 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง	3.49	0.0107	122.90	งานวิจัยนี้

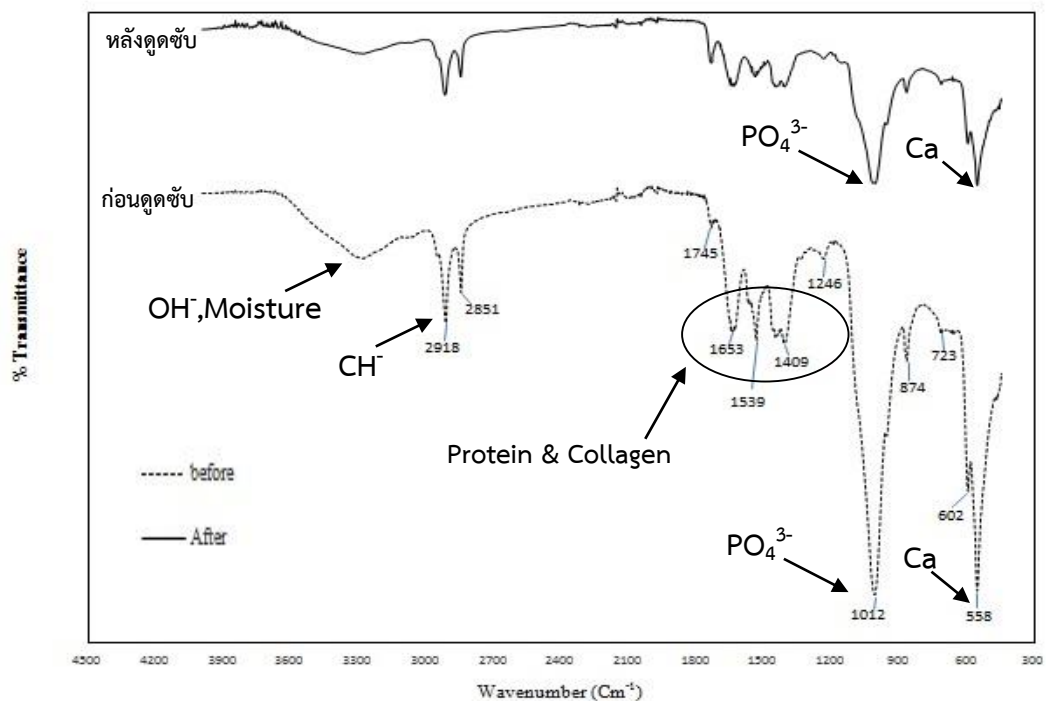
3) การวิเคราะห์ผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง Fourier Transforms Infrared Spectrometer (FTIR)

การหาค่าประกอบทางเคมีด้วยเครื่องฟลูเรีย ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปคโตรมิเตอร์ จะแสดงผลเป็นกราฟในช่วงเลขคลื่น 400-4000 cm⁻¹ ที่ความสูง (Peak) ของกราฟทำให้สามารถหาหมู่ฟังก์ชันนอลกรุป (Functional Group) ได้ โดยเฉพาะแนวโน้มปริมาณความเข้มข้นของฟอสเฟตในองค์ประกอบที่เปลี่ยนไป จากผลการวิเคราะห์ผงกระดูกหมูก่อนและหลังการดูดซับ แคลเซียมพบว่า ผงกระดูกหมูก่อนและหลังการดูดซับแคลเซียมเกิดพีคที่คล้ายคลึงกัน แต่พีคของผงกระดูกหมูก่อนการดูดซับแคลเซียมจะค่อนข้างสูงกว่าผงกระดูกหมูหลังการดูดซับแคลเซียม หมู่ฟังก์ชันนอลกรุปที่เกิดขึ้นของผงกระดูกหมูทั้งก่อนและหลังการดูดซับแคลเซียมประกอบไปด้วย ความชื้น (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 และ 1744.74

cm^{-1}) ฟอสเฟต (1033.01 cm^{-1}) คาร์บอนเนต (721.85 cm^{-1}) และแคลเซียม (562.57 cm^{-1} และ 604.15 cm^{-1}) (รูปที่ 22)

Chen และคณะ (1997) ได้กล่าวไว้ว่า ปริมาณฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ในสารละลายจะมีผลต่อกลไกการกำจัดโลหะหนักโดยตรง โดยจะไปมีผลต่อกลไกการละลายและการตกตะกอน (Dissolution and Precipitation) จากผลการวิเคราะห์ผงกระดูกต้มหลังการดูดซับแคดเมียมพบว่า กลุ่มแคลเซียมและกลุ่มฟอสเฟตลดน้อยลงเนื่องจากความสูงของพีคที่ต่ำลง ซึ่งหมายถึงความเป็นผลึก (Crystallinity) ก็จะลดลงด้วย

การศึกษานี้จะเห็นว่าเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้น (ion exchange) ในการกำจัดแคดเมียม สามารถสรุปกระบวนการที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีที่ลดน้อยลงเนื่องจากไอออนแคดเมียมส่วนหนึ่งเข้าไปแทนที่ไอออนแคลเซียมในองค์ประกอบของสารดูดซับกระดูก โดยจากการศึกษาของสุตารัตน์ เลิศวิทยานันท์ (2551) ได้ตรวจพบปริมาณแคลเซียมในสารละลายภายหลังจากการใช้ผงกระดูกดูดซับแคดเมียมที่ช่วงเวลาต่าง ๆ กัน แสดงว่าปริมาณแคลเซียมที่พบเกิดขึ้นจากการถูกแทนที่ด้วยไอออนแคดเมียม ดังนั้นสามารถยืนยันได้ว่ากลไกของการดูดซับคือ กลไกการดูดติดผิวและแลกเปลี่ยนไอออน

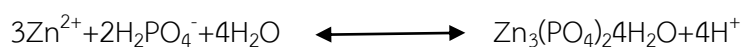


รูปที่ 22 การเปรียบเทียบกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของผงกระดูกหมูก่อนและหลังการดูดซับแคดเมียม

4) การศึกษาโครงสร้างผลึกของผงกระดูกหมูด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)

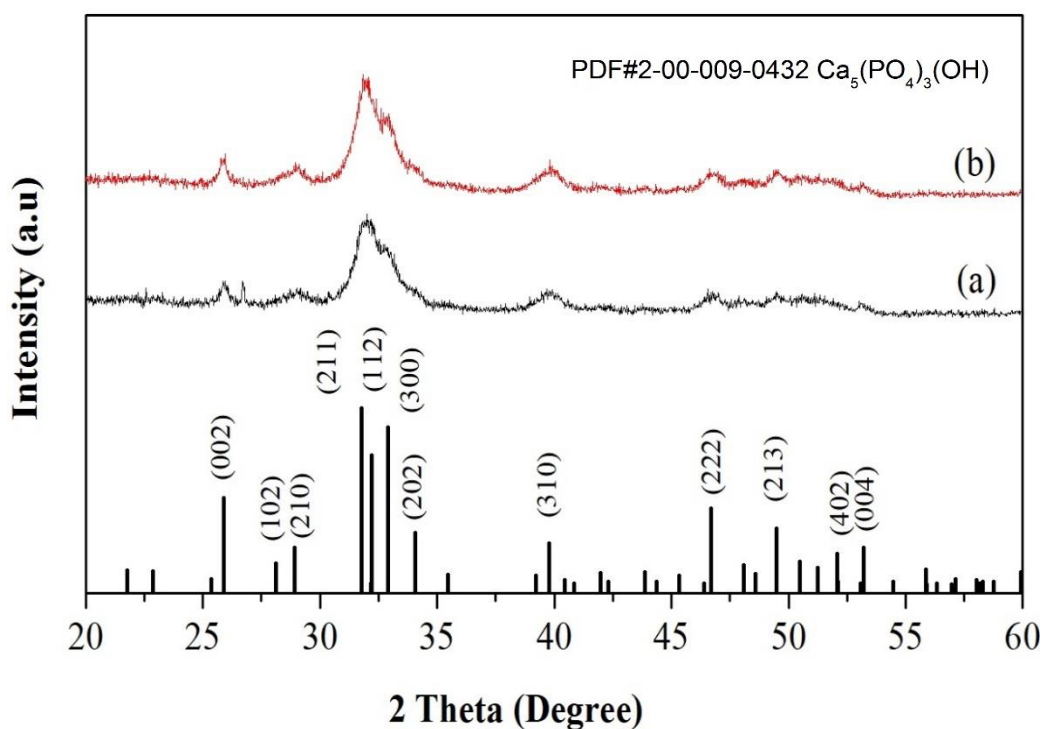
ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของผงกระดูกหมูที่ต้มด้วยอุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงทั้งก่อนและหลังการดูดซับแคดเมียมด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรคชัน สเปคโตรมิเตอร์ พบว่าผงกระดูกหมูมีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ สูตรเคมี $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ (รูปที่ 23) มีลักษณะเป็นผลึกรูปหกเหลี่ยม (hexagonal) โดยมีมิติด้าน a และ b เท่ากับ 9.35200 อังสตรอม ด้าน c เท่ากับ 6.88200 Å อัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสเป็น 1.70 เมื่อเปรียบเทียบกับกระดูกหมูกับกระดูกวัว พบว่า มีอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสใกล้เคียงกัน กระดูกวัวก็มีโครงสร้างผลึกเป็นรูปหกเหลี่ยม โดยมีมิติด้าน a และ b เท่ากับ 9.4230 Å ด้าน c เท่ากับ 6.87500 Å มีสูตรเคมี คือ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ อัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส 1.68-2.0 (Aoki, 1991 อ้างถึงใน วรรณภา ไชสีตะ มงคล, 2538)

สำหรับผงกระดูกหมูภายหลังจากการดูดซับแคดเมียมยังคงมีลักษณะโครงสร้างเหมือนเดิมไม่เปลี่ยนแปลง ไม่พบพีคที่เด่นชัด คือยังคงเป็นโครงสร้างเป็นแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ดังนั้นกลไกการกำจัดจึงไม่ใช่การละลายหรือการตกผลึก แต่เป็นการดูดติดผิวและติดค้างภายในรูพรุน ซึ่งหากเจอสภาวะพีเอชต่ำ H^+ อาจจะมีผลรบกวนต่อการดูดติดผิวได้ Chen และคณะ (1997) ได้สรุปไว้ว่ากลไกที่ใช้กำจัด Cd^{2+} จากสารละลายที่เป็นของเหลวคือ กลไกการดูดติดผิว (Sorption Mechanism) แต่จะไม่ตกผลึกกับฟอสเฟต ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับการทดสอบการกำจัด Cd^{2+} โดยผงกระดูกที่พีเอชต่ำ (พีเอช 2-3) ปรากฏว่าให้ประสิทธิภาพในการกำจัดได้น้อยที่สุด Misra และ Bowen (1981) (อ้างถึงใน Chen และ คณะ, 1997) ได้ศึกษาผลของปฏิกิริยาระหว่าง 2^+ กับ CaHAp ในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าจะเกิดรวมตัวเป็นผลึก $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Hopetite) ดังสมการ



Choy & Mckay (2005) รายงานว่าในขณะที่ไฮดรอกซีอะพาไทต์กำลังดูดซับไอออนของโลหะที่สภาวะพีเอชต่ำอยู่นั้นโครงสร้างความเป็นผลึกจะลดลง ดังนั้นรูปแบบของ XRD จะกลายเป็นลักษณะสารประกอบที่มีความเป็นผลึกต่ำ แต่พบว่าโครงสร้างความเป็นผลึกของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์จะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในสารละลายเบงก์ที่อยู่ในสภาวะพีเอชต่ำ เป็นไปได้ว่าไอออนของโลหะในสารละลายจะถูกดูดติดที่ผิวของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์และเข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุและรวมตัวกลายเป็นสารประกอบอะพาไทต์ใหม่ [เช่น $\text{Ca}_{10-x}\text{M}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$] อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการละลายของผลึกใหม่อาจจะไม่เสถียร

ที่พีเอชนั้นๆและอาจจะมีการรวมตัวเป็นสารประกอบใหม่ที่ไม่ใช่สารประกอบที่มีโครงสร้างแบบผลึกได้



รูปที่ 23 ผลวิเคราะห์ XRD ของการผงกระดูกหมูก่อนและหลังการดูดซับแคดเมียมในสารละลาย

(a) ก่อนการดูดซับแคดเมียม (b) หลังการดูดซับแคดเมียม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

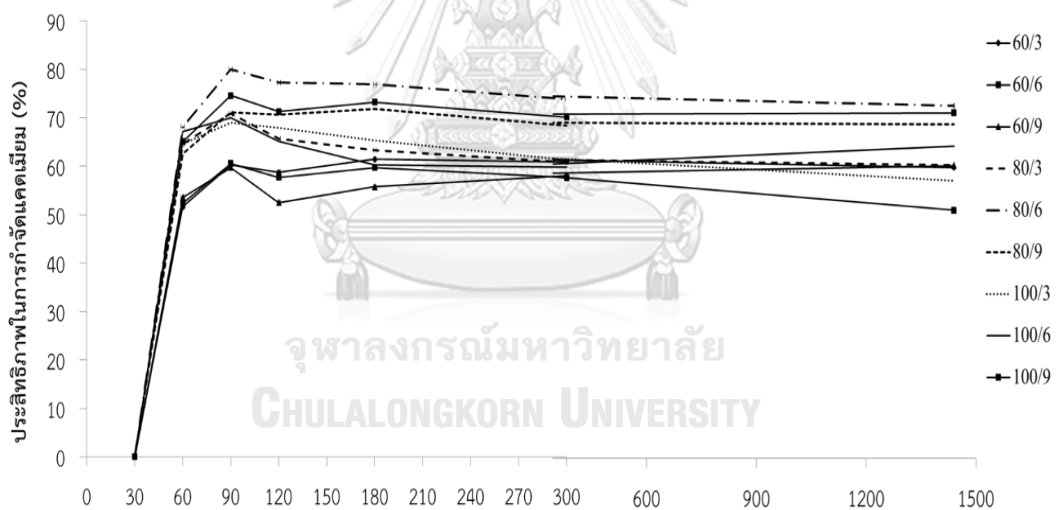
4.2 ส่วนที่ 2 : การศึกษาประสิทธิภาพภาพในการดูดซับแคดเมียมของผงกระดูกหมู

4.2.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมของผงกระดูกหมู

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมออกจากสารละลายที่พีเอช 6 ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรของผงกระดูกหมูทั้ง 9 ตัวอย่าง ได้แก่ SB60-3, SB60-6, SB60-9, SB80-3, SB80-6, SB80-9, SB100-3, SB100-6 และ SB100-9 พบว่า ผงกระดูกหมูที่เตรียมจากทุกสภาวะมีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมที่แตกต่างกัน (รูปที่ 25) ผงกระดูกหมูที่เตรียมจากการต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูงที่สุด การที่ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นไปได้ว่าเกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนทางเคมีที่ติดอยู่บนผิวของผงกระดูกหมู ซึ่งการต้มที่อุณหภูมิที่ไม่สูงนักทำให้ยัง

หลงเหลือสารอินทรีย์คาร์บอนและอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนอยู่บนผิวหน้าของผงกระดูก ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อการดูดซับโลหะไว้ที่ผิวของสารดูดซับ ในขณะที่การต้มที่อุณหภูมิที่สูงสามารถไปทำลายสารอินทรีย์คาร์บอนและอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนอยู่บนผิวหน้าของผงกระดูกได้ (Regmi et al., 2012; Song and Guo, 2012) และอุณหภูมิที่สูงจนเกินไปจะไปทำลายโครงสร้างของกระดูกทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง (Mukherjee และ คณะ, 1947 อ้างถึงใน สุदारัตน์ เลิศวิทยานนท์, 2551)

นอกจากนี้ อัตราการกำจัดแคดเมียมของสารดูดซับทั้ง 9 สภาวะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 60 นาที (รูปที่ 25) จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าพื้นที่ผิวที่มีขนาดใหญ่สามารถกำจัดแคดเมียมได้อย่างรวดเร็วในระยะเริ่มต้นการทดลอง อัตราการกำจัดแคดเมียมของผงกระดูกหุ้มจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสและจะลดลงจนเกือบคงที่เมื่อใกล้สู่จุดสมดุล เวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมในการเข้าสู่สมดุลของสารดูดซับ คือ 1 ชั่วโมง ดังนั้นผงกระดูกหุ้ม SB80-6 จึงถูกเลือกนำมาศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี และนำมาศึกษาในส่วนของ 3 ต่อไป



รูปที่ 24 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของผงกระดูกหุ้ม

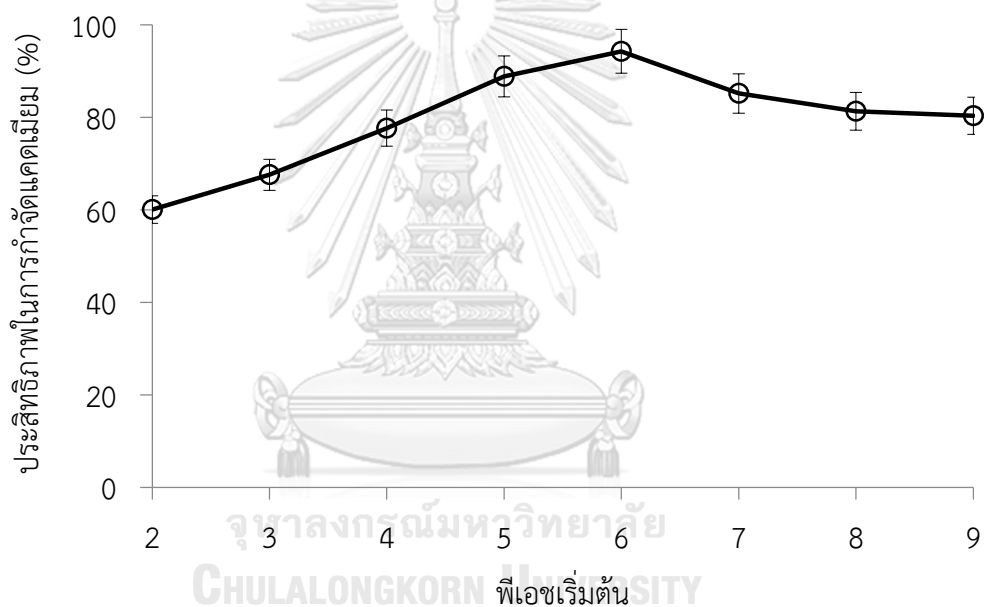
4.2.2 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพของการกำจัดแคดเมียมของผงกระดูกหมู SB80-6

จากการทดลองพบว่า ผงกระดูกหมูมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงขึ้นจากพีเอช 2 ถึง 9 ตามลำดับ พีเอช 2 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำที่สุด คือสามารถกำจัดได้ร้อยละ 60.08 และที่พีเอช 6 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงที่สุด โดยคิดเป็นร้อยละ 94.31 สำหรับพีเอช 3, 4, 5, 7 และ 9 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด โดยคิดเป็นร้อยละ 67.60, 77.70, 88.87, 85.19 และ 80.36 ตามลำดับ

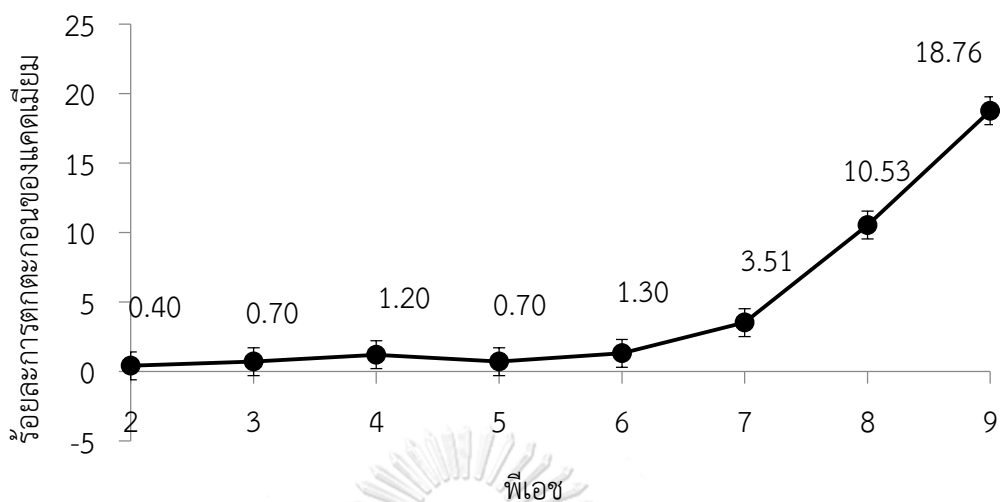
ค่าพีเอชในสารละลายส่งผลต่อกระบวนการดูดซับเป็นอย่างมาก เนื่องจากพีเอชสามารถเปลี่ยนประจุของผิวหน้าและความแข็งแรงของไอออนในตัวกลางของสารละลาย ในรูป 26 ชี้ให้เห็นว่าที่พีเอช 2 ประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมค่อนข้างต่ำ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะไปแก่งแย่งการดูดซับที่ผิวกับโลหะ ซึ่งจะไปรวบรวมนกลไกการดูดซับผิว ในขณะที่โลหะหนักประจุบวกจะถูกปลดปล่อยออกมาได้ดีภายใต้สภาวะความเป็นกรด (Forstner and Wittmann, 1981) ร้อยละการกำจัดแคดเมียมสูงสุดของผงกระดูกหมู SB80-6 พบที่พีเอชระหว่าง 5.0-6.0 และจะค่อยๆ ลดลงที่พีเอช 7.0 ถึง 9.0 เนื่องจากในขณะที่มีพีเอชสูงจะมีประจุลบพวกไฮดรอกไซด์อยู่สูง ทำแคดเมียมตกตะกอนในรูปของแคดเมียมไฮดรอกไซด์ ($Cd(OH)_2$) จากปฏิกิริยาของ $2NaOH + Cd(NO_3)_2 = Cd(OH)_2 + 2NaNO_3$ Blazquez et al., (2005) รายงานไว้ว่า ผลของการเปลี่ยนแปลงพีเอชด้วยการตกตะกอนของแคดเมียมเกิดขึ้นจากสารละลายต่าง ($NaOH$) ที่ถูกใช้ในการปรับพีเอช ซึ่งการตกตะกอนของ $Cd(OH)_2$ เกิดขึ้นที่พีเอช 10 และ 11 ขณะที่ Charerntanyarak (1999) ได้รายงานไว้ว่า พีเอชที่เหมาะสมที่สุดในการรวมและตกตะกอนทางเคมีในการบำบัดด้วยปูนขาวคือพีเอชที่มากกว่า 9.5 ขึ้นไป นอกจากนี้ยังรวมไปถึงประจุลบของฟอสเฟต และแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของผงกระดูกหมู ประจุลบเหล่านี้จะจะทำให้เกิดการดูดซับแคดเมียมซึ่งเป็นประจุบวกและตกตะกอนทางเคมีของตัวถูกดูดซับซึ่งจะทำให้ลดประสิทธิภาพของการดูดซับได้ (Chen และคณะ, 2006) Sukiya และคณะ (2003) ได้กล่าวไว้ว่า โดยทั่วไปกลไกการกำจัดโลหะ 2^+ ของไฮดรอกไซด์อะพาไทต์เกิดขึ้นได้สองกลไก ได้แก่ (1) การดูดซับโลหะไว้ที่ผิวหน้าของของเหลวแล้วค่อยๆ แพร่เข้าไปยังไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ และมีการปลดปล่อยแคดไอออนที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ออกมา (กระบวนการการแลกเปลี่ยนประจุ) และ (2) การละลายของไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ในสารละลายที่มีโลหะ 2^+ ตามด้วยการตกตะกอนและการตกตะกอนร่วมของโลหะฟอสเฟต (กระบวนการละลาย-ตกตะกอน) อย่างไรก็ตาม กลไกการละลาย-ตกตะกอนจะเกิดขึ้นในช่วงพีเอชต่ำ (พีเอช < 4) ในขณะที่ช่วงพีเอชสูงๆ กระบวนการในการกำจัดโลหะจะเป็นไปในลักษณะการดูดซับผิว และ/หรือ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Elouear et al., 2008 ; Valsmine-Jones และคณะ (1998)) Jeanjean และคณะ (1996) และ Mandjiny (1998) สรุปไว้ว่า ปฏิกิริยาของแคดเมียมที่เกิดขึ้นกับอะพาไทต์จะเริ่มต้นด้วยการดูดซับและค่อยๆ

เกิดการการแพร่อย่างช้าๆเข้าไปในโครงสร้างผลึกของอะพาไทต์ ดังนั้น แคลเซียมจะรวมตัวเข้าไป อยู่ภายในอะพาไทต์ กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในรูปของแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Cd}_5\text{H}_2(\text{PO}_4)_5(\text{s})$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Valsami-Jone และคณะ (1998) ที่รายงานไว้ว่า การกำจัดแคลเซียม โดยใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ ขึ้นกับค่าพีเอช และได้เสนอว่ารูปของแคลเซียมเป็นการรวมตัวกันของ แคลเซียม-แคลเซียม ฟอสเฟต ($\text{Cd}_x\text{Ca}_{5-x}(\text{PO}_4)_3\text{OH}(\text{s})$)

ในการทดลองครั้งนี้เลือกสภาวะที่ พีเอช 6 เนื่องจาก คือช่วงพีเอชที่ให้ประสิทธิภาพ ในการกำจัดแคลเซียมได้ดีที่สุด (ร้อยละ 88.87) สำหรับการกำจัดแคลเซียมออกจากสารละลาย สอดคล้องกับการศึกษาของ Regmi และคณะ (2012) และ Kolodynska และคณะ (2012) ซึ่งก็ พบว่าที่พีเอช 5.0-6.0 เป็นช่วงพีเอชที่ดีที่สุดในการกำจัดแคลเซียมออกจากสารละลาย



รูปที่ 25 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแคลเซียมของผงกระดูกหมู



รูปที่ 26 ผลของพีเอชต่อการตกตะกอนแคดเมียมในสารละลายเมื่อพีเอชเปลี่ยนแปลงไป

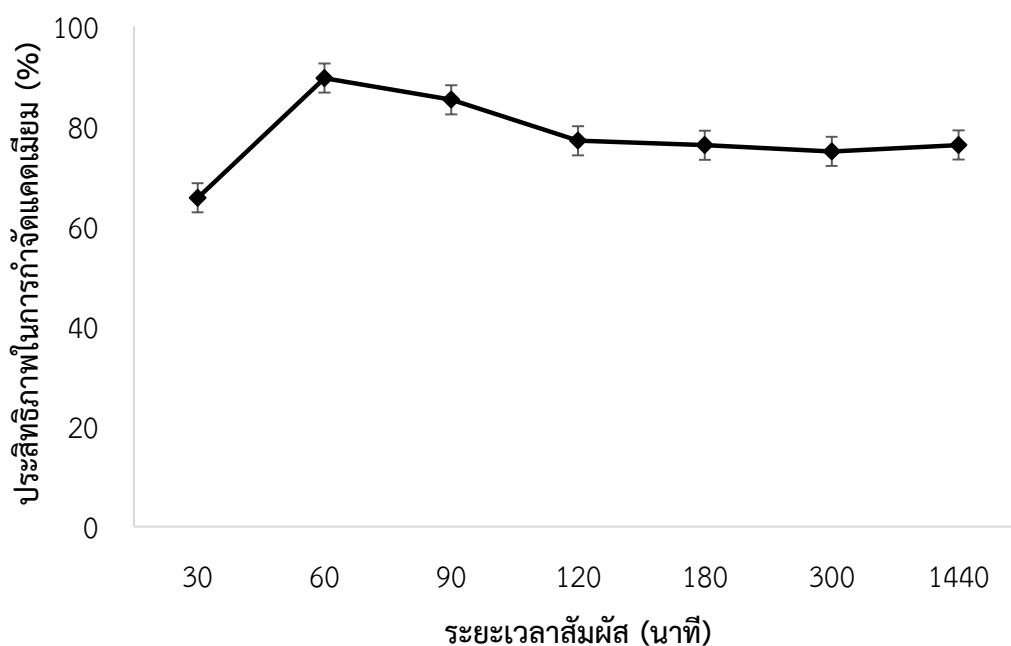
4.2.3 ศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับของผงกระดูกหมู

การทดลองนี้ใช้ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมเป็น 10 mg/L โดยเตรียมจากสารละลายมาตรฐานแคดเมียมไนเตรท

1) ผลการทดลองหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของผงกระดูกหมู SB80-6 ในการกำจัดแคดเมียม

ใช้ปริมาณผงกระดูกหมู 0.02 กรัม สารละลายแคดเมียมเข้มข้น 10 mg/L ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่พีเอช 6 เขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำในแต่ละช่วงเวลาคือ 30 นาที, 1, 1.30, 3, 5 และ 24 ชั่วโมง นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman no. 42 (0.45 ไมครอน) จากนั้นนำไปหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง AAS

จากการทดลองพบว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง มีร้อยละการกำจัดแคดเมียมสูงสุด คือ ร้อยละ 89.64 อัตราการกำจัดจะเป็นไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากพื้นที่ผิวที่มีขนาดใหญ่สามารถกำจัดแคดเมียมได้อย่างรวดเร็วในระยะเริ่มต้นการทดลอง แสดงดังรูปที่ 28

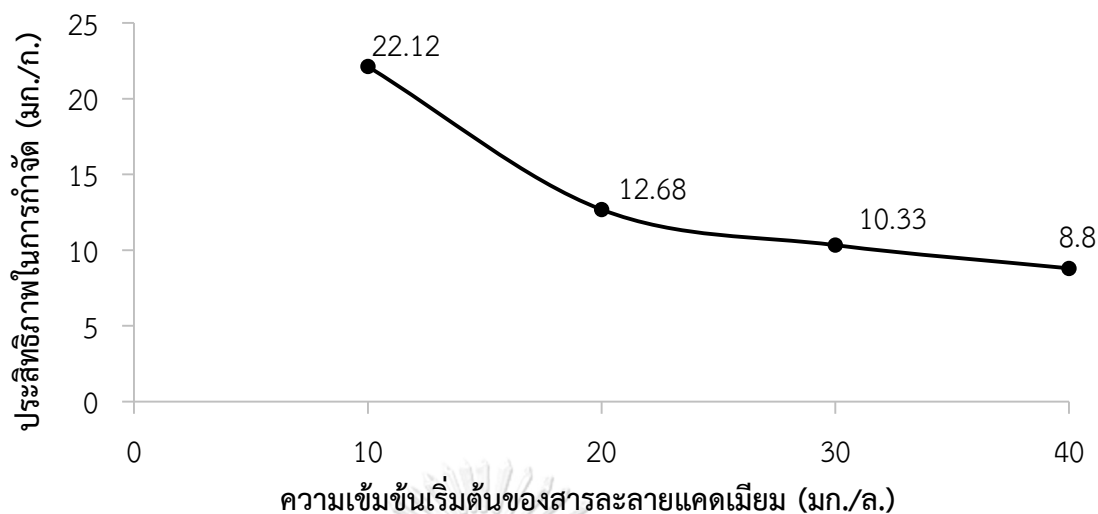


รูปที่ 27 ร้อยละการกำจัดแคดเมียมกับระยะเวลาสัมผัสของผงกระดูกหมู

4.2.4 ผลการทดลองหาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมกับประสิทธิภาพการกำจัดของผงกระดูกหมู

ใช้สารละลายแคดเมียมเข้มข้น 10, 20, 30 และ 30 mg/L ใช้ปริมาณผงกระดูกหมู 0.02 กรัม ที่พีเอช 5 เขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman no. 42 (0.45 ไมครอน) จากนั้นนำไปวัดค่าความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง AAS

ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียม 10, 20, และ 30 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียม 22.12, 12.68, 10.33 และ 8.8 mg/g ตามลำดับ ดังนั้นความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสม คือ 10 mg/L เพราะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูงที่สุด แสดงดังรูปที่ 29



รูปที่ 28 ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมของผงกระดูกหมูกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียม

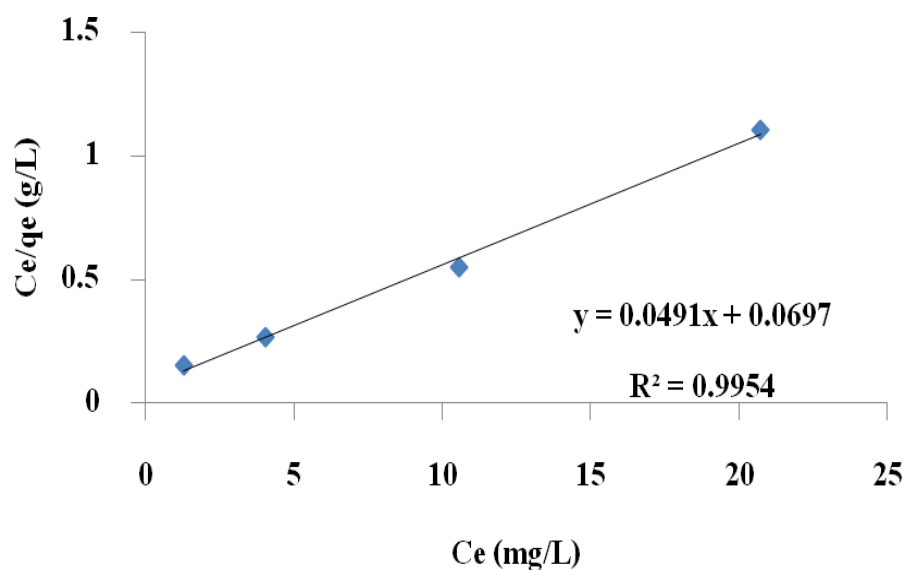
4.2.5 การศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับในการกำจัดแคดเมียม โดยการทดลองแบบเบตซ์

ไอโซเทิร์มการดูดซับเป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับของตัวถูกดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งในระหว่างที่การดูดซับกำลังดำเนินอยู่นั้น ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ยังสามารถที่จะหลุดออกจากการดูดซับได้ ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นสภาวะที่การดูดซับและการหลุดออกจากการดูดซับเกิดขึ้นในอัตราที่เท่ากัน ส่งผลให้ความเข้มข้นในสารละลายในระบบคงที่ ดังนั้นการหาสมการการดูดซับ (Adsorption Isotherm) จำเป็นที่จะต้องทำการทดลองจนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุลก่อน จากนั้นจึงสามารถที่จะนำค่าความเข้มข้นที่เหลือมาคำนวณหาสมการการดูดซับได้

ทำการทดลองโดยใช้ผงกระดูก 0.02 กรัม เติมสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอช 6 ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุดจากการทดลองที่ 4.1.3 จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 175 รอบต่อนาทีจนถึง 24 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาดำหนดนำไปกรองด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

เมื่อทราบความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือ ณ สมดุลของผงกระดูกปริมาณต่างๆแล้วสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการกำจัดแคดเมียมโดยถ่านกระดูกและปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ ณ สมดุลได้ดังแสดงในรูปที่ 29 ซึ่งพบว่าค่าความสามารถในการกำจัดแคดเมียมโดยผงกระดูกหมูมากที่สุดถึง 22.12 mg/g เมื่อพิจารณาผลการทดลองโดยอธิบายด้วย

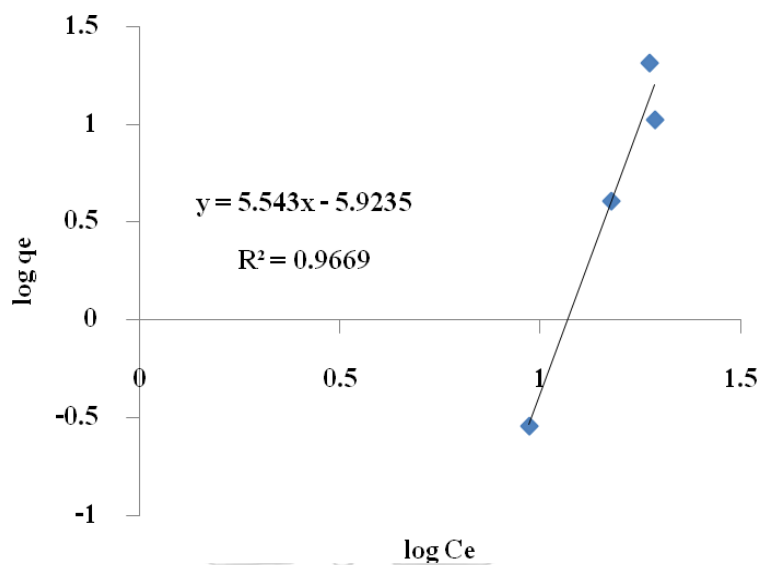
สมการทางคณิตศาสตร์ ไอโซเทิร์ม 2 แบบ คือ ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช และแบบแลงเมียร์ พบว่า ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์เหมาะสมกว่าแบบฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่า และมีความชันกราฟมากกว่า จึงเป็นระบบดูดซับที่ผิวของสารดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) สอดคล้องกับ (Lurtwitayapont and Srisatit, 2010) ดังรูปที่ 30 และ 31 สรุปค่าคงที่ไอโซเทิร์มการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมูแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช ได้ดังตารางที่ 15 และ 16



รูปที่ 29 ไอโซเทิร์มการดูดซับแคดเมียมของผงกระดูกหมูแบบแลงเมียร์

ตารางที่ 15 ค่าคงที่ไอโซเทิร์มการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมูแบบแลงเมียร์

ค่าคงที่	ไอโซเทิร์มการดูดซับ
K_L (L/mg)	0.70
q_{max} (mg/g)	20.37
r^2	0.9954



รูปที่ 30 ไอโซเทิร์มการดูดซับแคดเมียมของผงกระดูกหมูแบบฟรอนด์ลิช

ตารางที่ 16 ค่าคงที่ไอโซเทิร์มการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมูแบบฟรอนด์ลิช

ค่าคงที่	ไอโซเทิร์มการดูดซับ
$K_f(L/g)$	8.8
V_n	5.55
r^2	0.9669

4.3 ส่วนที่ 3 : การศึกษาประสิทธิภาพของผงกระดุกหมูที่ในการยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมของ ข้าวขาวดอกมะลิ 105

4.3.1 คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดลอง

ดินที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือดินที่ไม่ปนเปื้อนแคดเมียม (RE) และดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม (TK) โดยดินที่ไม่ปนเปื้อนได้นำมาจากพื้นที่นาที่ ตำบลบ้านดู่ อำเภออาจสามารถ จังหวัดร้อยเอ็ด ในส่วนดินปนเปื้อนนั้นได้นำมาจากพื้นที่นาในบ้านพะเด๊ะ ต.พระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติและองค์ประกอบเบื้องต้นของดินที่ใช้ในการทดลอง (ตารางที่ 17) พบว่า ดินไม่ปนเปื้อน (RE) มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วน เนื่องจากเนื้อดินมีองค์ประกอบของดินร่วนถึง 58% อินทรีย์วัตถุ 3.12% และ พีเอชในดินเท่ากับ 6.90 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกมีค่าเท่ากับ 6.8 cmol/kg นอกจากนี้ปริมาณแคดเมียมในดินทั้งหมดในดินมีค่าต่ำมากจนไม่สามารถวัดค่าได้ และปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินมีค่าเท่ากับ 36.8 mg/kg ส่วนดินปนเปื้อน (TK) มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทรายอินทรีย์วัตถุ 4.25% และ พีเอชในดินเท่ากับ 8.11 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกมีค่าเท่ากับ 15.83 cmol/kg ปริมาณแคดเมียมในดินทั้งหมดในดินมีค่าเท่ากับ 40 mg/kg และปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินมีค่าเท่ากับ 1,191 mg/kg

ตารางที่ 17 สมบัติต่างๆของดินก่อนการทดลอง

สมบัติดิน	ผลการวิเคราะห์		วิธีวิเคราะห์
	ดินปนเปื้อน	ดินไม่ปนเปื้อน	
พีเอช (1:2 w/v)	8.11±0.01	6.9±0.07	พีเอช Meter
sand : silt : clay (%)	37 : 45 : 18	58: 47: 24	Hydrometer
เนื้อดิน	Sandy loam	Sandy clay soil	
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (meq/100g)	15.83±0.02	6.8±0.50	Amonium acetate
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (%)	0.25±0.02	0.11±0.02	Kjedhal Method
อินทรีย์วัตถุ (%)	4.25±0.03	3.12±0.08	Walky-Black
อัตราส่วนคาร์บอน : ไนโตรเจน	9.84	16.45	
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (mg/kg)	27±1.00	5.12±0.11	Bray II
โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (mg/kg)	153±2.65	57±0.04	NH ₄ OAc
แคลเซียมที่เป็นประโยชน์ (mg/kg)	5,978±10.15	69.32±0.07	NH ₄ OAc
แมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์ (mg/kg)	296±10.15	5.9±0.15	NH ₄ OAc
สังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ (mg/kg)	15.68±0.10	4.16±0.08	NH ₄ OAc
แคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ (mg/kg)	9.50±0.05	N.D.	NH ₄ OAc
สังกะสีทั้งหมด (mg/kg)	1,191.83±	36.8	HNO ₃ and HCl acid Digestion
แคดเมียมทั้งหมด (mg/kg)	41.40	N.D.	HNO ₃ and HCl acid Digestion

4.3.2 ปริมาณแคดเมียมในพันธุ์ข้าวก่อนการทดลอง

พันธุ์ข้าวที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ คือ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ทำการปลูกข้าวในกระถาง 14 สัปดาห์ ข้าวจะงอกเป็นต้นกล้าเล็กๆสูงประมาณ 5 เซนติเมตร รอจนครบสามสัปดาห์จะมีความสูงประมาณ 25 เซนติเมตร จึงเก็บตัวอย่างต้นกล้าทั้งต้น คือ ราก ลำต้น และใบ นำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นแคดเมียมในต้นข้าวก่อนการทดลองพบว่า ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณแคดเมียมได้ เนื่องจากความเข้มข้นน้อยสุดของเครื่อง AAS ที่สามารถตรวจวัดได้ของแคดเมียม คือ 0.08 µg/L

4.3.3 การศึกษาผลของผงกระดูกหมูต่อการเจริญเติบโตของข้าวดอกมะลิ 105

1) อัตราการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้ง

1.1) ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

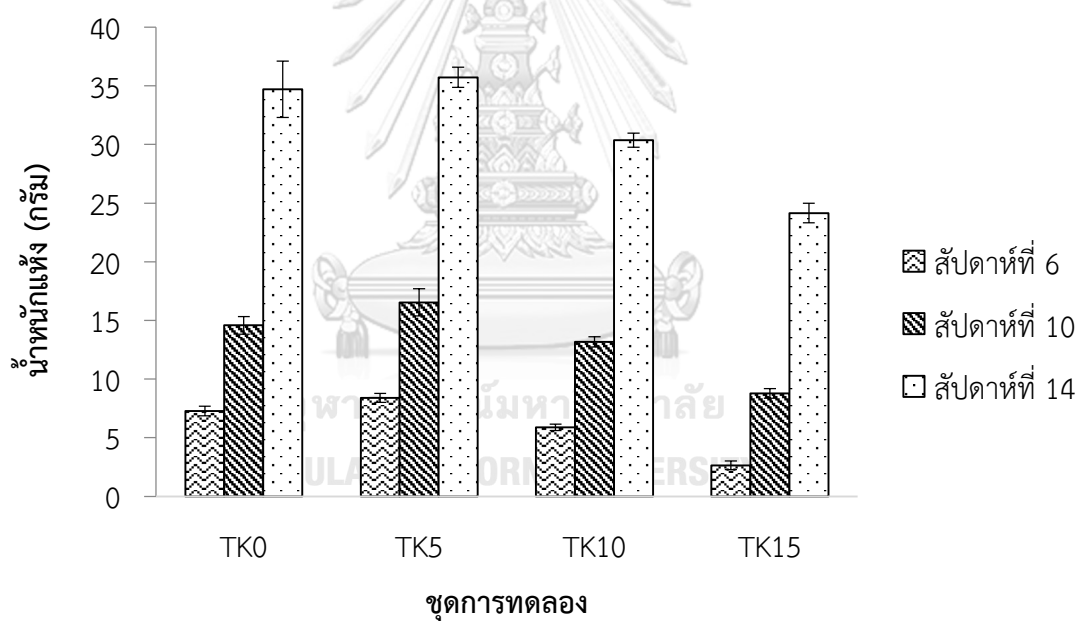
อัตราการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของพืช ศึกษาโดยทำการเก็บข้อมูลหลังจากการเก็บตัวอย่างในช่วงข้าวที่มีอายุ 6, 10, และ 14 สัปดาห์ และได้ทำการชั่งน้ำหนักหลังจากการนำต้นข้าวไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แบ่งชุดดินที่ใช้ในการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ TK0 TK5 TK10 และ TK15

จากรูปที่ 32 แสดงให้เห็นถึงอัตราการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้ง โดยพบว่าในทุกชุดของการทดลองมีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยในชุดการทดลอง TK0 ซึ่งใช้ดินปนเปื้อนและไม่ใส่ผงกระดูก พบว่า มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ยมากที่สุดในทุกระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวตัวอย่าง นอกจากนี้ในชุดการทดลองที่ใช้ TK5, TK10 และ TK15 พบว่า มีน้ำหนักแห้งน้อยกว่าในชุดการทดลองที่ใช้ดินไม่ปนเปื้อนและไม่ใส่ผงกระดูก และชุดการทดลองที่ใช้ดินปนเปื้อนและไม่เติมผงกระดูก โดยเฉพาะกระถางที่เติมผงกระดูกหมูที่อัตรา 15% การเจริญเติบโตของพืชมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่เติมผงกระดูกหมูในปริมาณที่สูงจึงทำให้ปริมาณธาตุอาหารในดินเสียสมดุลเพราะผงกระดูกหมูจะไปดูดซับธาตุอาหารบางชนิดออกจากดินและลดการเคลื่อนที่ได้ของธาตุอาหารในดิน ในทางตรงกันข้ามการเติมผงกระดูกหมูก็มีประโยชน์ในแง่ของการลดความหนาแน่นของดิน ซึ่งส่งผลให้ดินเพิ่มร่วนมากขึ้น นอกจากนี้ผงกระดูกหมูสามารถเพิ่มอากาศในดินได้ ดังนั้นผงกระดูกหมูจึงไปช่วยให้ธาตุอาหารไหลเวียนและส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชได้อีกด้วย (Park และคณะ, 2011) จากการศึกษาการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการเติมผงกระดูกหมูที่อัตรา 5% สามารถช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่เติมผงกระดูก 10% และ 15%

ตารางที่ 18 น้ำหนักแห้งของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ฤดูการเพาะปลูกที่ 1

ชุดการทดลอง	ระยะเวลา		
	สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14
TK0	7.28 ^c ±0.41	14.58 ^{bc} ±0.75	34.72 ^c ±2.40
TK5	8.39 ^d ±0.39	16.54 ^c ±1.17	35.72 ^c ±0.86
TK10	5.89 ^b ±0.27	13.17 ^b ±0.44	30.36 ^b ±0.61
TK15	2.64 ^a ±0.36	8.78 ^a ±0.40	24.15 ^a ±0.83

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกรความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 31 น้ำหนักแห้งของต้นข้าวดอกมะลิ 105 ในฤดูการเพาะปลูกที่ 1 ที่ระยะเวลา 14 สัปดาห์

1.2) ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ได้แบ่งชุดดินที่ใช้ในการทดลองออกเป็น 5 ชุดการทดลอง ได้แก่ RE0 TK0 TK5 TK10 และ TK15 สำหรับชุดการทดลอง TK0 TK5 TK10 และ TK15 ใช้ชุดดินเดิม (ดิน TK) จากการเพาะปลูกในฤดูกาลที่ 1 และเพิ่มดินชุดใหม่ในการทดลองนี้คือ ดิน RE เพื่อนำมาเป็นชุดดินอ้างอิงเพิ่มเติม

จากรูปที่ 33 แสดงให้เห็นถึงอัตราการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้ง โดยพบว่า โดยในชุดการทดลอง RE0 ซึ่งใช้ดินไม่ปนเปื้อนและไม่ใส่ผงกระดูก พบว่า มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ยมากที่สุดในทุกระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวตัวอย่าง และสามารถเจริญเติบโตต่อไปได้จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากเป็นดินที่ไม่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมใดๆ จึงทำให้ข้าวมีการเจริญเติบโตได้ดี จากการศึกษาของ Balestrasse et al. (2003) รายงานว่า แคดเมียมมีผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์และกระบวนการสังเคราะห์แสงลดลง โดยทั่วไปปริมาณแคดเมียมในพืชไม่ควรเกิน 0.2 mg/kg เนื่องจากแคดเมียมมีผลทำให้น้ำตาลโรบูโลสปีสฟอสเฟต และเอนไซม์โรบูโลสปีสฟอสเฟตคาร์บอกซิเลสลดลง ส่งผลทำให้กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชลดลง (Liphaazi และ Kirkham, 2006) และทำให้น้ำหนักแห้งของพืชลดลงด้วย ในขณะที่ชุดการทดลอง TK0 TK5 TK และ TK15 เริ่มมีอาการรากเน่า ใบเหลือง และยืนต้นตายในสัปดาห์ที่ 6 จึงทำให้ไม่พบข้อมูลน้ำหนักแห้งของชุดการทดลอง TK0 TK5 TK10 และ TK15 ในสัปดาห์ที่ 10 และ 14 สาเหตุที่พืชไม่สามารถเจริญเติบโตได้นั้นเนื่องจากในการศึกษารอบฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ไม่ได้มีการพรวนดินก่อนการปลูกข้าว ซึ่งอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ เนื่องจาก โครงสร้างดินที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกคือต้องมีขนาดใหญ่และขนาดเล็กในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน ความต่อเนื่องกันหรือการเชื่อมโยงต่อกันของช่องว่างในดินเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่ง เนื่องจากพืชต้องการน้ำและอากาศในการเจริญเติบโตในขณะที่รากพืชใช้พลังงานในการทำกิจกรรมต่างๆซึ่งต้องใช้ก๊าซออกซิเจนในการทำให้เกิดพลังงาน ส่วนของรากพืชต้องขับถ่ายของเสียพวกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนน้ำช่วยในการละลายธาตุอาหารให้อยู่ในรูปของสารละลาย ถ้าช่องว่างในดินไม่มีความต่อเนื่องจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากรากของพืชขาด ก๊าซออกซิเจน และในดินมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาก จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้มาก ทำให้ได้กรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ส่งผลให้ดินบริเวณนั้นเกิดเป็นดินกรดได้ ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2561) (Zartman, 1990) Stirzaker, Passiouta และ Wilms (1996) กล่าวว่าข้าวบาร์เลย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่แข็งเนื่องจากรากจะถูกจำกัดความสามารถในการเข้าถึงน้ำและอาหารเพราะดินที่ขาดช่องว่างเพื่อให้รากได้ซอนไซ จากการศึกษาผลของลักษณะเนื้อดินต่อการเจริญเติบโตของรากของพืชตระกูลขี้เหล็ก (*Senna obtusifolia*) ประเทศไนจีเรีย ของ Abdulazeez, (2007) โดยทำการศึกษาในดิน 5 ชนิด ได้แก่ ดินเหนียว ดินเหนียวปนทราย ดินร่วน ดินร่วนปนทราย และดินทราย จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า

เมล็ดพืชสามารถงอกและเจริญเติบโตได้ดีในดินร่วนมากกว่าดินประเภทอื่นๆ และสรุปได้ว่าดินร่วนเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชและรากพืชตระกูลขี้เหล็ก (*Senna obtusifolia*) มากที่สุด

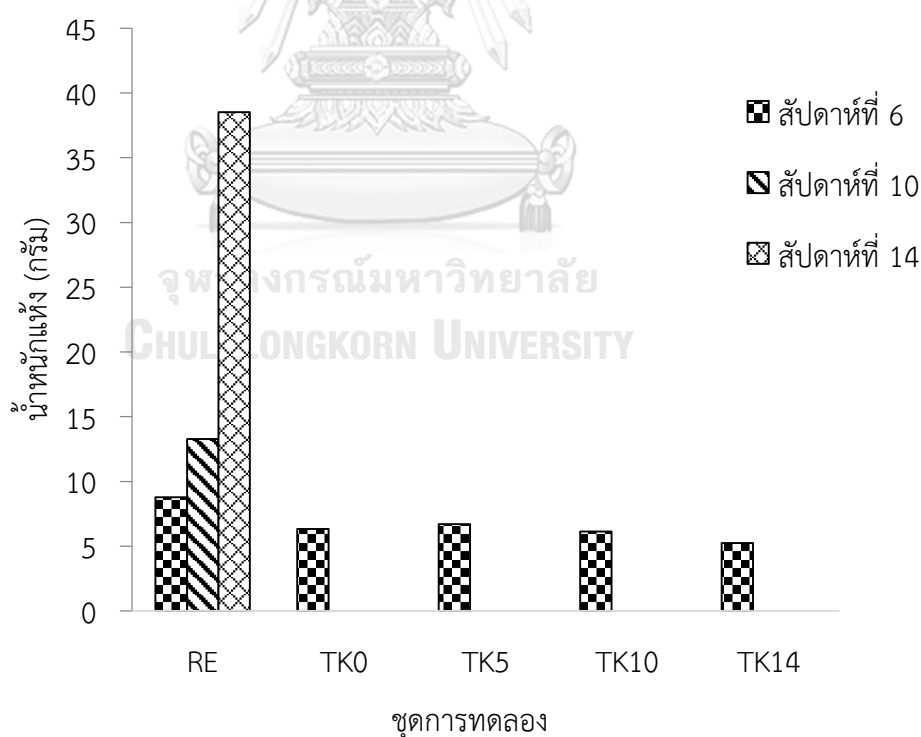
ตารางที่ 19 น้ำหนักแห้งของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ชุดการทดลอง	ระยะเวลา		
	สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14
RE0	8.78±0.09	13.28±0.76	38.52±0.41
TK0	6.17-6.49*	-	-
TK5	6.31-7.11*	-	-
TK10	6.13**	-	-
TK15	5.24**	-	-

หมายเหตุ : * หมายถึง เป็นผลน้ำหนักแห้งของพืชที่ได้จากค่าเฉลี่ยจากตัวอย่าง 2 ซ้ำ

** หมายถึง เป็นผลของน้ำหนักแห้งที่ได้จากตัวอย่าง 1 ซ้ำ

- หมายถึง ไม่พบข้อมูลเนื่องจากตัวอย่างพืชตาย



รูปที่ 32 น้ำหนักแห้งของต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ที่ระยะเวลา 14 สัปดาห์

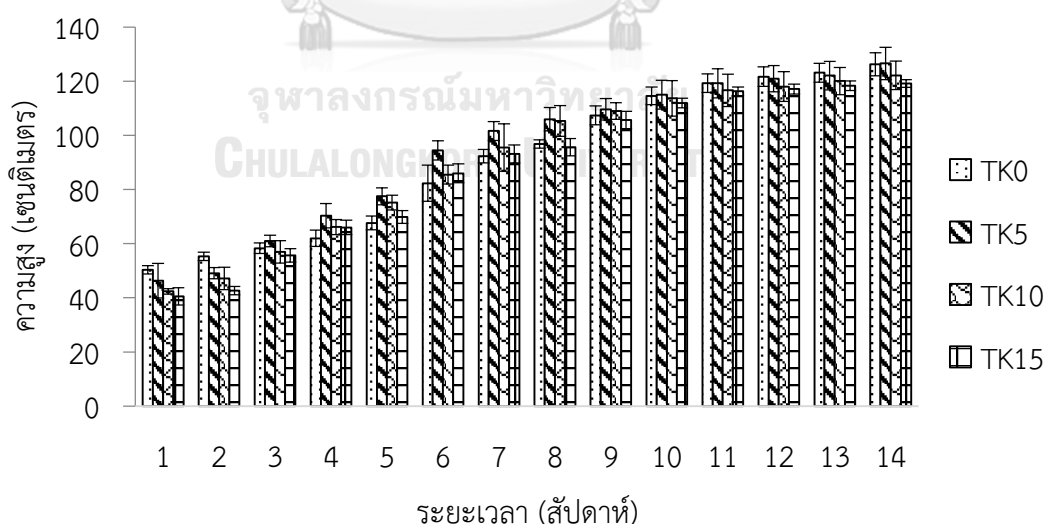
2) อัตราการเจริญเติบโตด้านส่วนสูง

2.1) ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

อัตราการเจริญเติบโตด้านส่วนสูงของพืช ศึกษาโดยทำการเก็บข้อมูลทุกสัปดาห์ เป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 14 สัปดาห์ แบ่งชุดดินที่ใช้ในการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ TK0, TK5, TK10, TK15

จากรูปที่ 35 แสดงให้เห็นถึงอัตราการเจริญเติบโตด้านส่วนสูง โดยพบว่าในทุกชุดของการทดลองมีส่วนสูงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการปลูกที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนสูงเฉลี่ยของส่วนลำต้นอยู่ในสัปดาห์สุดท้าย (สัปดาห์ที่ 14) อยู่ในช่วง 119.20-126.60 เซนติเมตร โดยกระถางที่มีส่วนสูงของลำต้นเฉลี่ยสูงสุด ได้แก่ ชุดการทดลองที่ใส่ผงกระดูก 5% เมื่อเปรียบเทียบความสูงเฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลองพบว่า ทุกชุดการทดลองมีความสูงเฉลี่ยของลำต้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ยกเว้นในชุดการทดลองที่ใช้ดินปนเปื้อนและมีการเติมผงกระดูกที่อัตราส่วน 15% มีความสูงเฉลี่ยแตกต่างจากชุดการทดลองอื่นๆ

สำหรับความยาวรากพบว่า มีความยาวเฉลี่ยอยู่ในช่วง 17.12-18.86 เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบความสูงเฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลองพบว่า ทุกชุดการทดลองมีความยาวรากเฉลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ยกเว้นชุดการทดลองที่ TK10 ที่มีความยาวรากเฉลี่ยแตกต่างจากชุดการทดลองอื่น



รูปที่ 33 ความสูงเฉลี่ยของลำต้นข้าวชาวดอกมะลิ105 ที่ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

ตารางที่ 20 ความสูงของลำต้นของข้าวหอมมะลิ 105 ที่ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

ชุดการทดลอง	สัปดาห์ที่													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
TK0	50.30 ^d ±11.11	55.33 ^b ±2.24	58.33 ^a ±4.16	62.00 ^a ±3.00	67.67 ^a ±2.52	82.33 ^a ±6.66	92.33 ^a ±2.52	96.83 ^a ±1.40	107.40 ^a ±3.10	114.60 ^a ±1.85	119.30 ^a ±3.41	121.73 ^a ±3.62	123.20 ^b ±3.48	126.27 ^a ±4.23
TK5	46.37 ^c ±1.16	49.07 ^a ±1.72	61.00 ^a ±2.18	70.33 ^b ±4.51	77.50 ^c ±3.12	94.50 ^b ±3.77	101.67 ^a ±3.51	106.00 ^b ±4.36	109.67 ^a ±4.01	115.07 ^a ±5.37	119.27 ^a ±5.34	121.00 ^a ±4.85	122.13 ^{ab} ±2.24	126.60 ^a ±5.95
TK10	42.37 ^b ±0.81	47.13 ^a ±5.37	57.00 ^a ±2.00	66.17 ^{ab} ±3.33	75.17 ^b ±2.75	85.50 ^a ±3.50	95.50 ^a ±8.76	105.33 ^b ±5.69	109.00 ^a ±6.61	113.73 ^a ±2.75	116.67 ^a ±1.32	118.07 ^a ±0.75	120.10 ^{ab} ±0.44	122.20 ^a ±0.46
TK15	40.57 ^a ±0.55	42.67 ^a ±2.52	55.67 ^a ±3.82	66.00 ^{ab} ±2.65	69.8 ^a 3±2.36	86.00 ^a ±3.00	93.17 ^a ±2.25	95.67 ^a ±2.08	105.73 ^a ±0.61	112.00 ^a ±1.80	116.30 ^a ±0.87	117.13 ^a ±0.35	118.37 ^a ±0.85	119.20 ^a ±1.61

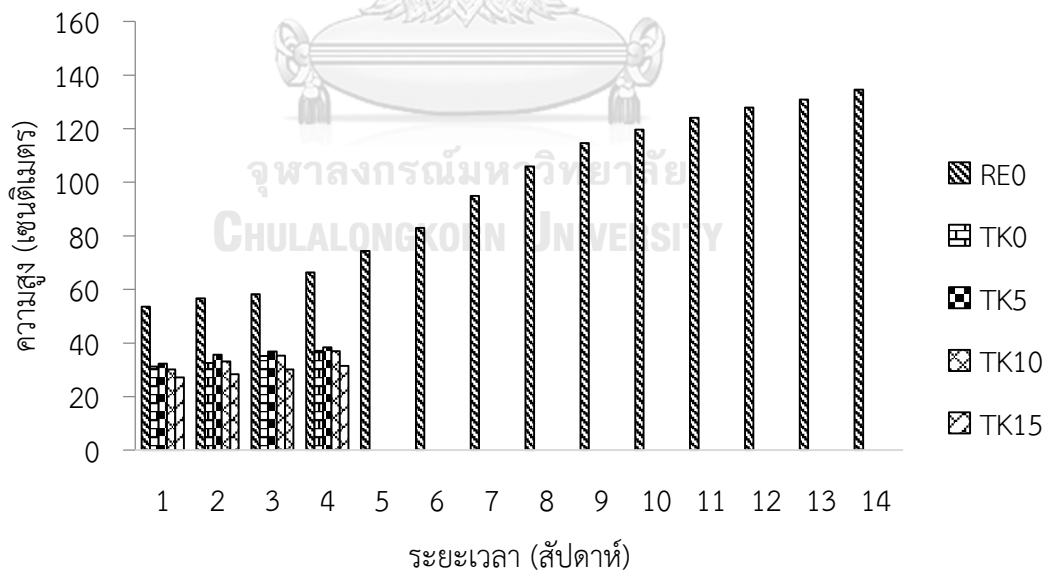
หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทาง

สถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

- หมายถึง ไม่มีข้อมูล เนื่องจากพืชตาย

2.2) ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ทำการปลูกพืชโดยใช้ชุดการทดลองเดิมกับฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 ได้แก่ TK0, TK5, TK10, TK15 และเพิ่มชุดการทดลองอีก 1 ชุด คือชุดการทดลอง RE0 เพื่อนำมาใช้เป็นชุดการทดลองอ้างอิงโดยใช้ดินจาก จังหวัดร้อยเอ็ด จากการตรวจวัดความสูงในทูลสปีดาร์ พบว่าส่วนสูงลำต้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการปลูกที่เพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 36) ส่วนสูงเฉลี่ยของส่วนลำต้นในสปีดาร์สุดท้าย (สปีดาร์ที่ 14) อยู่ในช่วง 27.20-134.55 เซนติเมตร โดยระยะทางที่มีส่วนสูงของลำต้นเฉลี่ยสูงสุด ได้แก่ ชุดการทดลอง RE0 เมื่อเปรียบเทียบความสูงเฉลี่ยในแต่ละชุดการทดลองพบว่า ชุดการทดลอง RE0 มีความสูงเฉลี่ยของลำต้นมากกว่าชุดการทดลองอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากดินที่ใช้ในการทดลองชุด RE0 เป็นดินที่ไม่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม สอดคล้องกับการศึกษาของ สรตนา เสนาะ (2546) ที่ได้ทำการศึกษาคัดเลือกธาตุโลหะหนักด้วยหญ้าแพก ทานตะวัน และข้าว ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว พบว่า ข้าวที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนมีความสูงมากกว่าข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนที่ทุกระยะเวลาของการเจริญเติบโต เนื่องจากแคดเมียมเข้าจับกับเอนไซม์ในกระบวนการสังเคราะห์ทรिพโทเฟนซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตฮอร์โมนออกซิน (Liu และคณะ, 2003) ซึ่งมีหน้าที่ในการควบคุมการขยายตัวของเซลล์และกระตุ้นการแบ่งเซลล์ (ศรีสม สุวรรณวงศ์, 2546)



รูปที่ 34 ความสูงเฉลี่ยของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ตารางที่ 21 ความสูงของลำต้นของข้าวหอมมะลิ 105 ที่ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ชุดการทดลอง	สัปดาห์ที่													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
RE0	53.57 ±2.12	56.73 ±1.23	58.20 ±0.87	66.33 ±3.00	74.33 ±2.52	82.97 ±1.66	94.90 ±0.66	105.90 ±6.51	114.60 ±3.68	119.63 ±3.40	124.07 ±3.23	127.93 ±2.32	130.90 ±3.10	134.55 ±4.05
TK0	31.20 ±1.10	32.60 ±1.48	35.20 ±1.41	37.10 ±0.92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TK5	32.30 ±0.81	35.70 ±0.14	36.80 ±0.78	38.40 ±0.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TK10	30.10	33.10	35.30	37.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TK15	27.20	28.40	30.10	31.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : - หมายถึง ไม่มีข้อมูล เนื่องจากพืชตาย

3) การให้ผลผลิตของข้าวดอกมะลิ 105

ผลผลิตเฉลี่ยข้าวเปลือกของข้าวดอกมะลิ 105 ปลูกในดินปนเปื้อน หลังจากสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 14 สัปดาห์ ทั้งในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 และ 2 คิดเป็นน้ำหนักแห้ง (กรัม) จากผลการทดลองในตารางที่ 22 พบว่า ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 ให้ผลผลิตเฉลี่ยของข้าวดอกมะลิมีแนวโน้มลดลงตามอัตราการเติมผงกระดูกหมูที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 9.67 – 14.19 กรัม โดยที่ชุดการทดลอง TK15 ให้ผลผลิตต่ำที่สุด ขณะที่ชุดการทดลอง TK5 ให้ผลผลิตของข้าวดอกมะลิ 105 สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ เมื่อคำนวณจากน้ำหนักผลผลิตข้าวหนึ่งตันที่ปลูกในเรือนทดลองนำไปคูณกับจำนวนต้นข้าวที่ปลูกได้ในหนึ่งไร่ของเกษตรกรในพื้นที่ (25,600 ต้น/ไร่) พบว่า มีผลผลิตสูงที่สุดเท่ากับ 190.72 กิโลกรัม/ไร่ ซึ่งมากกว่าชุดการทดลอง TK0 ที่ไม่มีการเติมผงกระดูกหมู ซึ่งมีผลผลิตเท่ากับ 123.65 กิโลกรัม/ไร่ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การเติมผงกระดูกหมูสามารถทำให้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นได้ โดยที่ชุดการทดลอง TK5 คืออัตราการเติมผงกระดูกหมูที่เหมาะสมที่สุดต่อการเพิ่มผลผลิตของข้าวดอกมะลิ 105 ของการศึกษาครั้งนี้ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตข้าวต่อไร่ของดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในดินทั่วไป พบว่า ข้าวดอกมะลิ 105 ให้ผลผลิตอยู่ที่ 363 กิโลกรัม/ไร่ (กรมการข้าว, 2561) ซึ่งมากกว่าผลผลิตสูงสุดของการศึกษาครั้งนี้ อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ไม่ได้คาดหวังในเรื่องของผลผลิตข้าวที่ได้ เนื่องจากการทดลองในภาชนะปลูกโดยมีการปลูกในโรงเรือนเท่านั้น และเป็นการปลูกข้าวช่วงนอกฤดูกาล ดังนั้นผลผลิตที่ได้จึงไม่สามารถเป็นคำตอบที่แท้จริงของการปลูกข้าวหรือทำนาในพื้นที่จริงได้ อีกทั้งต้องการทราบถึงการปนเปื้อนของแคดเมียมในเมล็ดข้าวเท่านั้น

ตารางที่ 22 ผลผลิตเฉลี่ยของข้าวดอกมะลิ 105 หลังจากสิ้นสุดการทดลอง ที่ปลูกในดินปนเปื้อน แคดเมียมที่ปริมาณการเติมผงกระดูกหมูที่แตกต่างกัน

ชุดการทดลอง	ผลผลิตเฉลี่ย (น้ำหนักแห้ง) (กรัม)	
	ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1	ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2
RE0	-	15.52±0.69
TK0	13.18 ^{bc} ±0.97	*
TK5	14.19 ^c ±0.25	*
TK10	12.30 ^a ±0.26	*
TK15	9.67 ^a ±0.31	*

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95

เปอร์เซ็นต์

- หมายถึง ไม่พบข้อมูลเนื่องจากเริ่มปลูกเฉพาะในฤดูกาลที่ 2

* หมายถึง ไม่พบข้อมูลเนื่องจากพืชตายก่อนการเก็บเกี่ยว

4.3.4 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆข้าว

การศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียมนั้น ได้วางแผนการทดลองออกเป็น 4 ชุด ได้แก่ TK0, TK5, TK10, TK15 เมื่อครบระยะของการเก็บตัวอย่างได้ทำการเก็บตัวอย่างข้าวไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนต่างๆของข้าว

1) ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

1.1) ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ)

ผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ต้นและใบ) ที่ปลูกในดินปนเปื้อนแต่ละชุดการทดลอง และมีการใส่ผงกระดูกที่อัตรา 0% (TK0), 5% (TK5), 10% (TK10) และ 15% (TK15) พบว่า ทุกชุดการทดลองมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) โดยมีแนวโน้มลดลงตามความปริมาณการเติมผงกระดูกหมูที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมผงกระดูกหมูจะเป็นผลทำให้ลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดิน และเพิ่มค่า พีเอชของน้ำในดินและดินให้สูงขึ้น (Chen และคณะ, 2006) และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือดินของแต่ละชุดการทดลอง พบว่า ชุดการทดลอง TK0 แตกต่างกับชุดการทดลอง TK5, TK10 และ TK15 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ในขณะที่ชุดการทดลองที่ TK5, TK10 และ TK15 ไม่มีความแตกต่างกัน ความเข้มข้นของแคดเมียมพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 1.23 – 14.68 mg/kg โดยค่าสูงสุดพบในชุดการทดลอง TK0 ที่ปลูกในดินปนเปื้อนที่ไม่ใส่ผงกระดูกหมู ค่าต่ำสุดพบในชุดการทดลอง TK15 ที่ปลูกในดินปนเปื้อนที่ใส่ผงกระดูกหมู 15% ซึ่งผลการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Chen, Zhu และ McKay (2006) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของการเติมถ่านกระดูกต่อการเคลื่อนที่ได้ของตะกั่วในดินปนเปื้อนตะกั่ว ซึ่งพบว่า การเติมถ่านกระดูกในดินทำให้อัตราการดูดซับตะกั่วของผักกาดขาวลดลง และปริมาณการสะสมตะกั่วในผักกาดขาวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเติมถ่านกระดูกที่เพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

1.2) ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้ดิน (ราก)

ผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในราก ที่ในชุดการทดลอง TK0, TK5, TK10 และ TK15 พบว่า ทุกชุดการทดลองมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในราก โดยมีแนวโน้มลดลงตามความปริมาณการเติมผงกระดูกหมูที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณการสะสมแคดเมียมในแต่ละชุดการทดลองพบว่า ชุดการทดลอง TK0 แตกต่างกับชุดการทดลอง TK5, TK10, และ TK10 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ในขณะที่ระหว่างชุดการทดลอง TK5, TK10 และ TK15 ไม่มีความแตกต่างกัน ความเข้มข้นของแคดเมียมในรากพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 2.93 – 44.46 mg/kg โดยค่าสูงสุดพบในชุดการทดลอง TK0 ค่าต่ำสุดพบ

ในชุดการทดลอง TK15 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) และในส่วนใต้ดิน (ราก) พบว่า ทุกชุดการทดลองพบการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้ดิน (ราก) มากกว่า ส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Murakami (2007) ซึ่งได้ศึกษาการสะสมแคดเมียมในพืช 3 ชนิด ได้แก่ ข้าว ถั่วเหลือง และข้าวโพด ปลูกโดยใช้ดินนาที่มีระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมเท่ากับ 0.83-4.29 mg/kg ทำการทดลองในเรือนทดลอง ใช้ระยะเวลา 60 วัน จากผลการศึกษาพบว่า พืชทั้ง 3 ชนิดมีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมไว้ที่รากมากกว่าส่วนยอด นอกจากนั้น Tanaka และคณะ (2007) ได้สรุปผลการศึกษาไว้ว่าแคดเมียมสามารถเคลื่อนย้ายจากรากสู่ตอซังและใบข้าวโดยผ่านทางท่อลำเลียงน้ำ จากนั้นจึงผ่านเข้าไปยังท่อลำเลียงอาหาร และเมล็ดข้าวซึ่งเป็นที่สะสมคาร์โบไฮเดรตจะได้รับสารอาหารรวมถึงแคดเมียมจากท่อลำเลียงอาหารด้วยเช่นกัน แต่การเคลื่อนย้ายแคดเมียมในท่อลำเลียงอาหารน้อยกว่าท่อลำเลียงน้ำส่งผลให้เมล็ดข้าวกลี้ยงมีการสะสมแคดเมียมน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตอซังและใบ และปริมาณแคดเมียมในส่วนต่างๆของพืชมีแนวโน้มเรียงจากมากไปหาน้อยดังนี้ ตอซัง>ใบ>เมล็ดข้าวกลี้ยง

1.3) ปริมาณการสะสมแคดเมียมในเปลือกข้าวและเมล็ดข้าว

ผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในเปลือกข้าวและเมล็ดข้าว ที่ปลูกในดินปนเปื้อนแต่ละชุดการทดลอง พบว่า ทุกชุดการทดลองมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในเปลือกข้าวและเมล็ดข้าว โดยมีแนวโน้มลดลงตามความปริมาณการเติมผงกระดูกหมูที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณการสะสมแคดเมียมในแต่ละชุดการทดลองพบว่า ทุกชุดการทดลองมีการสะสมแคดเมียมในเปลือกข้าวและเมล็ดข้าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยความเข้มข้นของแคดเมียมในเมล็ดข้าว พบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 0.13 – 1.37 mg/kg โดยค่าสูงสุดพบในชุดการทดลอง TK0 และค่าต่ำสุดพบในชุดการทดลอง TK15 สำหรับความเข้มข้นของแคดเมียมในเปลือกข้าว พบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 0.30 – 2.73 mg/kg โดยค่าสูงสุดพบในชุดการทดลอง TK0 และค่าต่ำสุดพบในชุดการทดลอง TK15 ดังตารางที่ 23

ปริมาณการสะสมแคดเมียมในเมล็ดข้าวในทุกชุดการทดลอง มีค่าการสะสมแคดเมียมไม่เกินค่ามาตรฐานตามที่ CODEX กำหนดไว้คือ ไม่เกิน 0.2 mg/kg ยกเว้นในชุดการทดลอง TK0 ซึ่งเป็นชุดการทดลองที่ไม่ได้เติมผงกระดูกหมู อีกทั้งยังพบว่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในเปลือกข้าวมีค่าสูงกว่าในเมล็ดข้าว ทั้งนี้เนื่องมาจากขั้นตอนในการแยกเปลือกออกจากเมล็ดโดยการแกะเปลือกด้วยมือที่ละเมล็ด อาจส่งผลให้ส่วนของรำข้าวซึ่งมีจมูกข้าวรวมอยู่ด้วยเป็นส่วนที่มีการปนเปื้อนสูงที่สุดปะปนมากับเมล็ดได้ Liu และคณะ (2006) ศึกษาการดูดดึงและการเคลื่อนย้ายแคดเมียมในข้าว 6 สายพันธุ์ โดยพบว่า ปริมาณแคดเมียมที่ข้าวดูดดึงเข้าไปมีเพียงเล็กน้อย

เท่านั้น ประมาณร้อยละ 0.73 ที่สามารถเข้าไปสะสมอยู่ในส่วนของเมล็ดข้าว อีกทั้งยังพบว่าค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นแคดเมียมที่จมูกข้าวนั้นมีปริมาณมากกว่าในเปลือกและเมล็ดข้าวถึง 5 เท่า และพบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมในข้าวกล้องมีความเกี่ยวข้องกันอย่างมีนัยสำคัญกับความเข้มข้นของไนโตรเจน แคดเมียมอาจจะรวมตัวกับเมทิลโลไฮไดรเจนในกระบวนการสร้างเมล็ด เนื่องจากยีนส์ของหมู่ซิลฟีไฮดริลมีองค์ประกอบของโปรตีนอยู่มาก และเคยมีรายงานแล้วว่าพบในข้าวและข้าวโพด ดังนั้นข้าวขาวขัดสีจะเป็นตัวเลือกที่ปลอดภัยต่อการบริโภคมากกว่าข้าวกล้อง สำหรับผู้บริโภคข้าวในเขตพื้นที่ปนเปื้อน ถึงแม้ว่าข้าวกล้องจะมีประโยชน์ในแง่ของคุณค่าทางอาหารมากกว่าข้าวขัดสีก็ตาม

นอกจากนี้ ธนภัทร ปลื้มพวง และคณะ (2558) ศึกษาการปนเปื้อนแคดเมียมในดินและการสะสมในผลผลิตข้าวบนพื้นที่ตำบลแม่ตาวและตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก พบว่า ปริมาณแคดเมียมของข้าวสาร มีปริมาณแคดเมียมสูงสุดคือ 9.27 mg/kg สำหรับปริมาณแคดเมียมในแกลบ พบว่า มีปริมาณแคดเมียมสูงสุด 10.42 mg/kg ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานของ EU และ CODEX ที่กำหนดไว้ไม่ควรเกิน 0.4 mg/kg และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมระหว่างข้าวสารและแกลบ ก็พบว่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในแกลบมีค่าสูงกว่าในเมล็ดข้าวเช่นเดียวกันกับการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งก็พบว่าการสะสมแคดเมียมในเปลือกข้าว (แกลบ) มีค่ามากกว่าในเมล็ดข้าว โดยมีค่าเท่ากับ 0.30 และ 0.13 mg/kg ตามลำดับ (ตารางที่ 20)

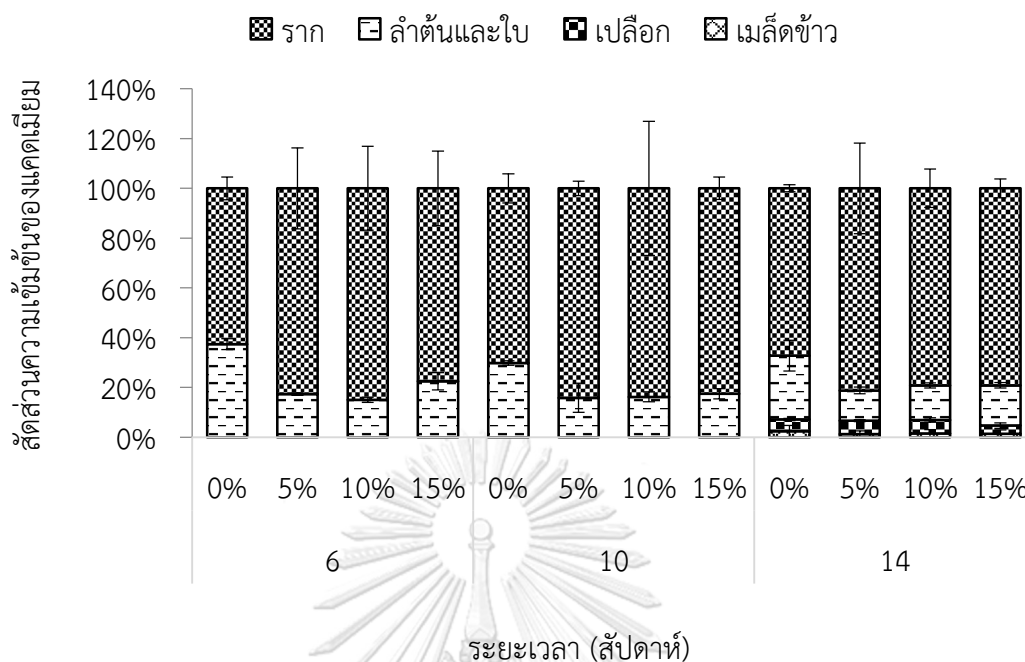
ตารางที่ 23 ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ตามปริมาณการเติมผงกระดูกหมู ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

ส่วนต่างๆ ของพืช	ชุดการ ทดลอง	ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียม (mg/kg)		
		สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14
ลำต้น (ใบ+ลำต้น)	TK0	13.65 ^b ±0.79	13.75 ^b ±0.41	14.68 ^b ±3.56
	TK5	1.97 ^a ±0.06	2.00 ^a ±0.74	1.87 ^a ±0.20
	TK10	1.50 ^a ±0.10	1.67 ^a ±0.21	1.57 ^a ±0.12
	TK15	1.30 ^a ±0.20	1.47 ^a ±0.18	1.48 ^a ±0.10
ราก	TK0	22.86 ^c ±1.66	32.40 ^b ±2.69	38.50 ^b ±0.82
	TK5	9.40 ^a ±1.85	10.60 ^a ±0.36	12.50 ^a ±2.80
	TK10	8.47 ^a ±1.68	8.60 ^a ±2.76	8.87 ^a ±0.86
	TK15	4.47 ^a ±0.86	6.93 ^a ±2.76	7.27 ^a ±0.35
เมล็ด	TK0			1.37 ^b ±0.08
	TK5			0.20 ^a ±0.03
	TK10			0.17 ^a ±0.05
	TK15			0.13 ^a ±0.04
เปลือก	TK0			2.73 ^c ±0.25
	TK5			0.83 ^c ±0.06
	TK10			0.60 ^b ±0.10
	TK15			0.30 ^a ±0.10

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น

95 เปอร์เซ็นต์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 35 สัดส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวดอกมะลิ 105 ตามระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

2) ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

2.1) ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ)

ผลการศึกษ ปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) ในแต่ละชุดการ พบว่า ชุดการทดลอง RE0 มีปริมาณแคดเมียมน้อยมากจนไม่สามารถวัดค่าได้ สำหรับชุดการทดลอง TK0, TK5, TK10 และ TK15 ในสัปดาห์ที่ 6 พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) มีแนวโน้มลดลงตามความปริมาณการเติมผงกระดูกหมูที่เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของแคดเมียมพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.90 – 8.97 mg/kg โดยค่าสูงสุดพบในชุดการทดลอง TK0 ค่าต่ำสุดพบในชุดการทดลอง TK15 หลังสัปดาห์ที่ 6 พบว่าพืชมีอาการหยุดการเจริญเติบโตและใบเริ่มเหลือง และตายในที่สุด จึงทำให้ไม่พบข้อมูลการสะสมแคดเมียมในสัปดาห์ที่ 10 และ 14 (ตารางที่ 24)

2.2) ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้ดิน (ราก)

ผลการศึกษ ปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในราก ในแต่ละชุดการทดลอง พบว่า ชุดการทดลอง RE0 มีปริมาณแคดเมียมน้อยมากจนไม่สามารถวัดค่าได้ และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณการสะสมแคดเมียมในชุดการทดลอง TK0, TK5,

TK10 และ TK15 ในสัปดาห์ที่ 6 พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนรากมีแนวโน้มลดลงตามความปริมาณการเติมผงกระดูกหมูที่เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของแคดเมียมในรากพบว่ามีความอยู่ระหว่าง 3.40 – 12.08 mg/kg โดยค่าสูงสุดพบในชุดการทดลอง TK0 ค่าต่ำสุดพบในชุดการทดลอง TK15

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) และในส่วนใต้ดิน (ราก) (รูปที่ 38) พบว่า ทุกชุดการทดลองพบการสะสมแคดเมียมในรากมากกว่า ลำต้นและใบ เนื่องจากรากพืชดูดซับโลหะหนักจากน้ำในดินโดยตรงผ่านทางราก เกิดโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) หรือ วิธีการคายน้ำ (Convection) (Culter & Rains, 1974) เมื่อเข้าสู่แวคิวโอล (Vacuole) ซึ่งมีโทโนพลาสต์ (Tonoplast) คุณสมบัติเหมือนเยื่อหุ้มเซลล์ กำจัดของเสียประเภทโลหะหนักซึ่งเป็นพิษต่อเซลล์จะถูกดูดเก็บไว้ที่แวคิวโอล (นิตย ศกุนรักษ์, 2542) แวกิวโอลเป็นแหล่งสะสมของเสียในเซลล์พืช โดยปกติโทโนพลาสต์จะไม่ยอมให้ของเสียเหล่านั้นไหลกลับเข้าสู่ไซโตพลาสซึม (Cytoplasm) ได้อีก โลหะหนักจึงถูกเก็บสะสมไว้ที่ราก สอดคล้องกับผลการทดลองของ Murakami (2007) ซึ่งได้ศึกษาการสะสมแคดเมียมในพืช 3 ชนิด ได้แก่ ข้าว ถั่วเหลือง และข้าวโพด ปลูกโดยใช้ดินนาที่มีระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมเท่ากับ 0.83-4.29 mg/kg ทำการทดลองในเรือนทดลอง ใช้ระยะเวลา 60 วัน จากผลการศึกษาพบว่า พืชทั้ง 3 ชนิดมีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมไว้ที่รากมากกว่าส่วนยอด

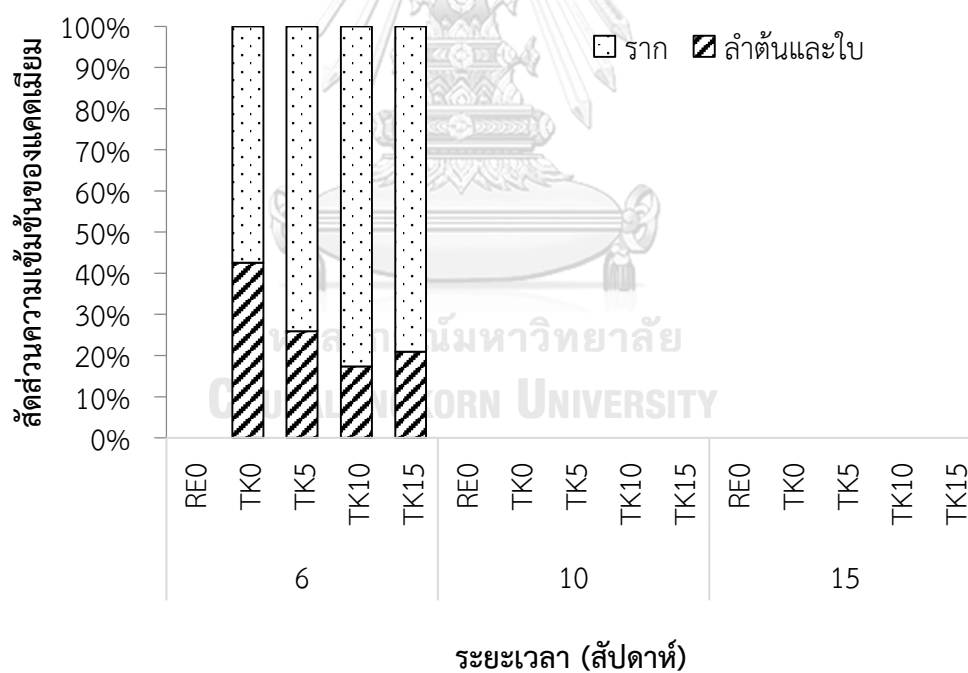
Sneddon และคณะ (2006) ซึ่งได้ศึกษาการเติมกระดูกปนเพื่อยับยั้งการเคลื่อนย้ายของตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียมในดิน โดยการศึกษาในแบบคอลัมน์ จากการศึกษาพบว่า การเติมกระดูกปนลงในดินทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกชะลงในน้ำที่ชะดินลดลงเมื่อเทียบกับชุดควบคุม และมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนการเติมกระดูกปนในดินที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการเติมกระดูกปนในอัตราที่มากขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับหรือการละลาย และการแลกเปลี่ยนประจุได้

ตารางที่ 24 ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ตามปริมาณการเติมผงกระดูกหมู ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ส่วนต่างๆของพืช	ชุดการทดลอง	ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียม (mg/kg)		
		สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14
ลำต้น (ใบ+ลำต้น)	RE0	ND	ND	ND
	TK0	8.97±1.22	-	-
	TK5	1.20±0.21	-	-
	TK10	1.14*	-	-
	TK15	0.90*	-	-
ราก	RE0	ND	ND	ND
	TK0	12.08±0.95	-	-
	TK5	4.00±0.71	-	-
	TK10	5.75*	-	-
	TK15	3.40*	-	-

หมายเหตุ : ND หมายถึง มีปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถวัดค่าได้

* มีเพียง 1 ตัวอย่าง จึงไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยได้



รูปที่ 36 สัดส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าวดอกมะลิ 105 ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

4.3.5 ปริมาณการสะสมสังกะสีในข้าว

การศึกษาปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนต่างๆของข้าวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียมนั้น ได้วางแผนการทดลองออกเป็น 4 ชุด ได้แก่ TK0, TK5, TK10 และ TK 15 เมื่อครบระยะของการเก็บตัวอย่างได้ทำการเก็บตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนต่างๆของข้าว

1) ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

1.1) ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ)

ผลการศึกษาปริมาณการสะสมสังกะสีทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) ในแต่ละชุดการทดลอง พบว่า ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนเหนือดินของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเติมผงกระดูกหมูที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณการสะสมสังกะสีในแต่ละชุดการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่ TK0 แตกต่างกับชุดการทดลองอื่นๆอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ในขณะที่ชุดการทดลอง TK5, TK10 และ TK15 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ความเข้มข้นของสังกะสีพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 26.44 – 379.10 mg/kg โดยค่าสูงสุดพบในชุดการทดลอง TK0 ค่าต่ำสุดพบในชุดการทดลอง TK15 สอดคล้องกับการทดลองของ มนัส พงศ์พลาดิสัย (2553) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดซับแคดเมียมและสังกะสีของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนจากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก จากผลการศึกษาพบว่า ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในชุดการทดลองที่ใช้ดินปนเปื้อนที่มีการใส่ปุ๋ยอินทรีย์มีปริมาณการสะสมสังกะสีต่ำกว่าชุดการทดลองที่ไม่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ที่ทุกระยะเวลาของการทดลอง Pinto และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสารอินทรีย์ในการดูดซับแคดเมียม สังกะสี ทองแดง และเหล็กด้วยข้าวฟ่าง ทำการเปรียบเทียบระหว่างใส่และไม่ใส่สารอินทรีย์ ใช้ระยะเวลาในการปลูกข้าวฟ่าง 20 วัน จากการศึกษาสรุปได้ว่า สารอินทรีย์สามารถช่วยลดการดูดซับสังกะสี ทองแดง และเหล็กได้ เมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ใส่สารอินทรีย์

1.2) ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนใต้ดิน (ราก)

ผลการศึกษาปริมาณการสะสมสังกะสีทั้งหมดในราก ที่ปลูกในดินแต่ละชุดการทดลอง พบว่า ทุกชุดการทดลองมีปริมาณการสะสมสังกะสีในรากแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยมีแนวโน้มลดลงตามความปริมาณการเติมผงกระดูกหมูที่เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสังกะสีในราก พบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 101.13 – 565.42 mg/kg โดยค่าสูงสุดพบในชุดการทดลอง TK0 ค่าต่ำสุดพบในชุดการทดลอง TK15 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) และในส่วนใต้ดิน (ราก) พบว่า ทุกชุดการทดลองพบการสะสมสังกะสีในรากมากกว่า ลำต้นและใบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Assawadithalerd (2009) ซึ่งได้

ทำการศึกษาผลของการเติมปุ๋ยอินทรีย์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อการดูดตั้งแคดเมียมในดินนาข้าว ซึ่งก็พบว่ารากข้าวสามารถสะสมสังกะสีได้มากกว่าในส่วนต้นข้าวและเมล็ดข้าว และยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ สรตนา เสนาะ (2548) เรื่องการดูดตั้งโลหะหนักของหญ้าแฝก ทานตะวัน และข้าว ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า รากข้าวสามารถสะสมสังกะสีได้มากกว่าตอซังและเมล็ดข้าว

1.3) ปริมาณการสะสมสังกะสีในเมล็ดข้าวและเปลือกข้าว

ผลการศึกษาปริมาณการสะสมสังกะสีในเมล็ดข้าวและเปลือกข้าว ที่ปลูกในดินแต่ละชุดการทดลอง พบว่า ทุกชุดการทดลองมีปริมาณการสะสมสังกะสีในเปลือกข้าว และเมล็ดข้าว โดยมีแนวโน้มลดลงตามความปริมาณการเติมผงกระดูกหมูที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณการสะสมแคดเมียมในแต่ละชุดการทดลองพบว่า ทุกชุดการทดลองมีการสะสมแคดเมียมในเปลือกข้าวและเมล็ดข้าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยความเข้มข้นของสังกะสีในเมล็ดข้าว พบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 40.92-51.90 mg/kg โดยค่าสูงสุดพบในชุดการทดลองที่ TK0 ค่าต่ำสุดพบในชุดการทดลอง TK15 สำหรับความเข้มข้นของสังกะสีในเปลือกข้าว พบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 1.86 – 7.85 mg/kg โดยค่าสูงสุดพบในชุดการทดลอง TK0 ค่าต่ำสุดพบในชุดการทดลอง TK15 ดังตารางที่ 25

นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณการสะสมสังกะสีในเมล็ดข้าวและเปลือกข้าวมีค่าต่ำกว่าปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนเหนือดิน (ต้นข้าว) เนื่องมาจากสังกะสีมีการเคลื่อนย้ายจากรากสู่ส่วนเหนือดินโดยการสร้างพันธะกับสารประกอบอินทรีย์ในท่อลำเลียงน้ำ และมีการสะสมในคลอโรพลาสต์ แวคิวโอล และผนังเซลล์ จึงส่งผลให้สังกะสีมีการสะสมในส่วนของ ลำต้นและใบค่อนข้างมากกว่าที่จะสะสมในเมล็ดข้าวและเปลือกข้าว (Kabata-Pendias และ Pendias, 2001)

การดูดตั้งแคดเมียมและสังกะสีของพืชขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ คุณสมบัติของดิน ชนิดของพืช กรรมวิธีในการปลูก การใส่ปุ๋ย และคุณสมบัติของโลหะหนัก (Chaney, 2010) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดตั้งแคดเมียมและสังกะสีของพืชยังไม่เป็นที่แน่ชัด (Adiloglu และคณะ 2005) ปฏิกริยาร่วมกันของแคดเมียมและสังกะสีไม่ได้ขึ้นกับปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งแต่ขึ้นกับหลายปัจจัยด้วยกัน ตัวอย่างเช่น กระบวนการการดูดตั้ง กระบวนการเคลื่อนย้าย และกระบวนการสะสม อาจกล่าวได้ว่าอัตราส่วนระหว่างแคดเมียมและสังกะสีในส่วนต่างๆของพืชเป็นปัจจัยหนึ่งในการควบคุมการทำงานในลักษณะที่เกื้อหนุนหรือตรงกันข้ามกันระหว่างโลหะสองชนิดนี้ (Kabata-Pendias, 1992) Hocine-Benabid et al., (2007) ได้กล่าวถึงปฏิสัมพันธ์ของสังกะสีและแคดเมียม ในต้นถั่วเขียว (*Phaseolus vulgaris*) ไว้ว่าระดับความเข้มข้นของแคดเมียมและสังกะสีในพืชเป็นไป

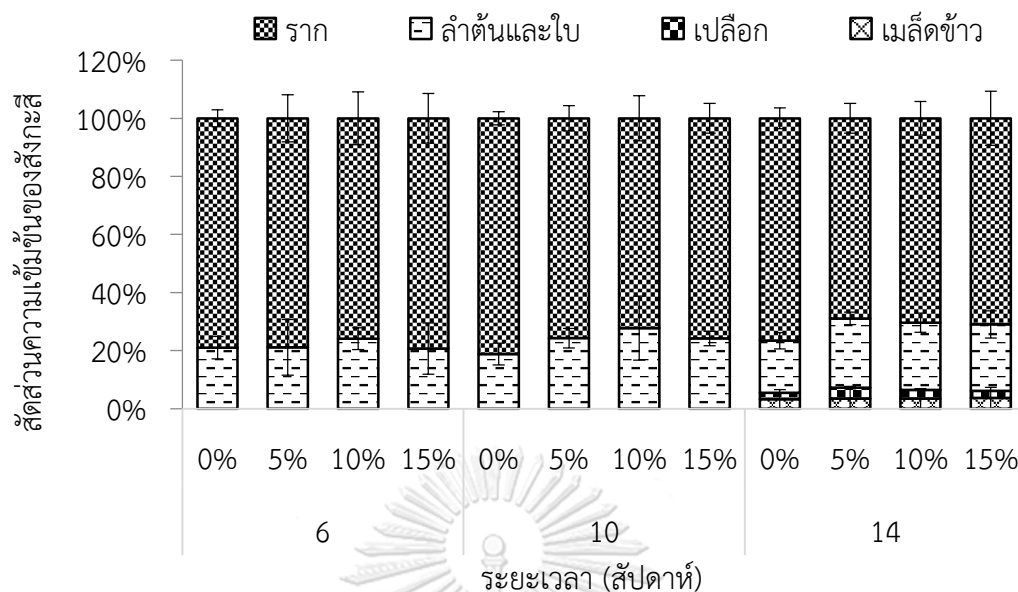
ในลักษณะแก่งแย่งกัน นอกจากนี้ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีของพืช Xian (1989) ได้รายงานไว้ว่า สัดส่วนของโลหะที่พืชดูดดึงต่อปริมาณโลหะในดินที่ปนเปื้อนจากเหมืองสังกะสีพบว่า พืชมีการดูดดึงแคดเมียมได้มากกว่าสังกะสี บทบาทหน้าที่ของการเคลื่อนย้ายแคดเมียมในพืชและการยับยั้งยั้งสารเคมีที่มีคุณสมบัติคล้ายๆกับสังกะสียังไม่เป็นที่ทราบอย่างแน่ชัด (Pence et al, 2000; Tan et al, 2011) Sessitsch et al. (2013) ได้ทำการศึกษาบทบาทของพืชและแบคทีเรียในกระบวนการเคลื่อนที่และกระบวนการดูดดึงจุลธาตุในดินปนเปื้อนของพืช ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่ากลุ่มแบคทีเรียที่อาศัยอยู่บริเวณรอบๆรากพืชมีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของพืชและกระบวนการดูดดึงโลหะหนักของพืช จำนวนประชากรแบคทีเรียสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของพืชโดยทำให้การสะสมโลหะหนักในพืชเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพและอัตราการดูดดึงโลหะของพืชได้ด้วย แบคทีเรียที่ตรึงไนโตรเจนจะสร้าง molybdate ร่วมกับ tetra-dentate catecholates ซึ่งก็คือสารคีเลตที่จะไปยึดกับแคดเมียม Croes et al., (2013) (Croes et al., 2013) ได้รายงานไว้ว่า ปัจจัยหลักที่ผักกาด (*Brassica napus*) สามารถทนทานต่อแคดเมียม/สังกะสีนั้นมาจากความสามารถในการละลายของฟอสฟอรัสและกระบวนการไนตริฟิเคชัน ซึ่งพืชชนิดนี้ได้ปลดปล่อยฮอร์โมนพืชที่มีชื่อว่า 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase และสาร siderophores จากกระบวนการไนตริฟิเคชันและการละลายของฟอสเฟต ซึ่งแบคทีเรียที่อาศัยอยู่บริเวณรากพืชเป็นตัวผลิตสาร siderophores และ/หรือ กรดอินทรีย์ ส่งผลให้เพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ของธาตุปริมาณน้อยที่เป็นอันตรายในดินและเป็นผลทำให้พืชดูดดึงขึ้นไปด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Ma et al., 2014) ที่รายงานไว้ว่า แบคทีเรียที่ตรึงไนโตรเจนจะไปเพิ่มการดูดดึงแคดเมียมของต้น *Populus x Canescens*

ตารางที่ 25 ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีในส่วนต่างๆของข้าวดอกมะลิ 105

ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

ส่วนต่างๆ ของพืช	ชุดการ ทดลอง	ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสี (mg/kg)		
		สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14
ลำต้น (ใบ+ลำต้น)	TK0	110.00 ^b ±20.00	126.67 ^b ±25.17	133.33 ^b ±20.82
	TK5	66.30 ^a ±29.95	84.47 ^{ab} ±11.84	93.27 ^a ±8.59
	TK10	70.07 ^{ab} ±10.87	92.17 ^{ab} ±36.49	83.40 ^a ±11.97
	TK15	52.57 ^a ±22.36	72.33 ^a ±7.41	75.63 ^a ±15.57
ราก	TK0	413.33 ^c ±15.28	546.67 ^c ±15.28	570.00 ^b ±26.46
	TK5	246.67 ^b ±25.17	263.33 ^b ±15.28	270.00 ^a ±20.00
	TK10	220.00 ^b ±26.46	239.67 ^{ab} ±25.89	253.33 ^a ±20.82
	TK15	201.33 ^a ±21.78	226.67 ^a ±15.28	234.67 ^a ±30.89
เมล็ด	TK0			24.50 ^b ±1.06
	TK5			13.57 ^a ±1.17
	TK10			12.53 ^a ±0.25
	TK15			12.20 ^a ±0.26
เปลือก	TK0			16.37 ^d ±0.25
	TK5			15.03 ^c ±1.33
	TK10			10.63 ^b ±0.15
	TK15			8.20 ^a ±0.26

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวดิ่ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 37 สัดส่วนความเข้มข้นของสังกะสีในส่วนต่างๆของข้าวดอกมะลิ 105 ในฤดูการเพาะปลูกที่ 1

2) ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

2.1) ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ)

ผลการศึกษ ปริมาณการสะสมสังกะสีทั้งหมดในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) ในแต่ละชุดการทดลอง พบว่า ชุดการทดลอง RE0 มีปริมาณสังกะสีน้อยมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ สำหรับชุดการทดลอง TK0, TK5, TK10 และ TK15 ในสัปดาห์ที่ 6 พบว่า ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเติมผงกระดูกหมูที่เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสังกะสีพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 19.54– 53.60 mg/kg โดยค่าสูงสุดพบในชุดการทดลอง TK0 ค่าต่ำสุดพบในชุดการทดลอง TK15 หลังสำหรับสัปดาห์ที่ 6 พบว่าพืชมีอาการหยุดการเจริญเติบโตและใบเริ่มเหลือง และตายในที่สุด จึงทำให้ไม่สามารถเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ได้

2.2) ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนใต้ดิน (ราก)

ผลการศึกษ ปริมาณการสะสมสังกะสีทั้งหมดในรากในแต่ละชุดการทดลอง พบว่า มีปริมาณการสะสมสังกะสีในรากแตกต่างกัน โดยมีแนวโน้มลดลงตามความปริมาณการเติมผงกระดูกหมูที่เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสังกะสีในรากพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 10.40 – 85.83 mg/kg โดยค่าสูงสุดพบในชุดการทดลอง TK0 ค่าต่ำสุดพบในชุดการทดลอง TK15 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) และในส่วนใต้ดิน (ราก) พบว่า

ทุกชุดการทดลองพบการสะสมสังกะสีในรากมากกว่า ลำต้นและใบ เนื่องจากรากนั้นเป็นส่วนที่สัมผัสกับจุลธาตุหรือธาตุอาหารต่างๆโดยตรง จึงทำให้มีปริมาณการสะสมแคดเมียมไว้ในส่วนรากมากกว่าส่วนอื่นๆซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของพนัส พงศ์ผลาดิสัย (2553) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของใช้ปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนจากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งก็พบว่า รากข้าวสามารถสะสมสังกะสีได้มากกว่าในส่วนต้นข้าวและเมล็ด นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Assawadithalerd (2009) ที่ได้ทำการศึกษาผลของการเติมปุ๋ยอินทรีย์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อการดูดดึงแคดเมียมในดินนาข้าวก็พบว่า รากข้าวสามารถสะสมสังกะสีได้มากกว่าในส่วนต้นข้าวและเมล็ดข้าวอีกด้วย จากรายงานของ Adriano (2001) ที่มีการศึกษาพืชพรรณในระบบสิ่งแวดล้อมป่าที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมจากการกระทำของมนุษย์พบว่า มีการสะสมของแคดเมียมในราก>ใบพืช>กิ่งก้าน>ลำต้น ลำดับ ซึ่งเหตุผลหนึ่งที่มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนรากมากกว่าส่วนอื่นๆ

ตารางที่ 26 ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ตามปริมาณการเติมผงกระดูกหมู ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

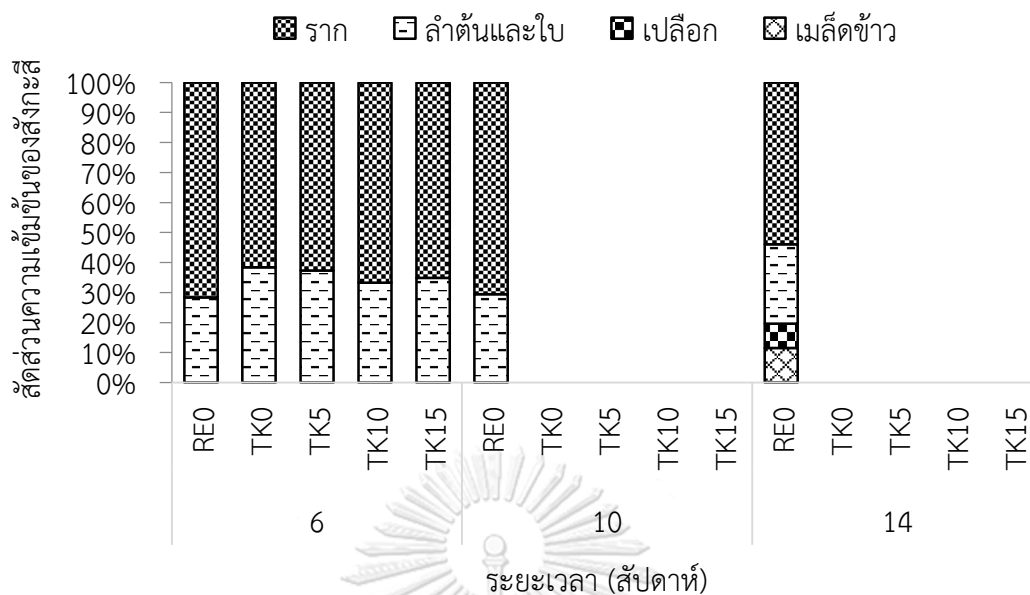
ส่วนต่างๆ ของพืช	ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นของสังกะสี (mg/kg)		
		สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14
ลำต้น (ใบ+ลำต้น)	RE0	4.11±0.26	6.87±0.98	8.07±0.37
	TK0	53.60±1.67*	-	-
	TK5	25.67±1.57*	-	-
	TK10	20.23**	-	-
	TK15	19.54**	-	-
ราก	RE0	10.40±0.71	11.62±0.88	16.47±0.64
	TK0	85.83±1.27*	-	-
	TK5	43.17±1.34*	-	-
	TK10	40.52**	-	-
	TK15	36.48**	-	-
เมล็ด	RE0			3.51±0.22
เปลือก	RE0			2.48±0.30

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

* หมายถึง มีเพียง 2 ตัวอย่าง เนื่องจากพืชตาย จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติได้

** หมายถึง มีเพียง 1 ตัวอย่าง เนื่องจากพืชตาย ทำให้ไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยได้

- หมายถึง ไม่มีข้อมูลเนื่องจากพืชตาย



รูปที่ 38 ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีในส่วนต่างๆของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในฤดูการเพาะปลูกที่ 2

เมื่อเปรียบเทียบแนวโน้มการดูดดึงสังกะสีรอบการเพาะปลูกที่ 1 และรอบการเพาะปลูกที่ 2 พบว่ามีปริมาณสังกะสีในรอบการเพาะปลูกที่ 2 แนวโน้มลดลงเนื่องจากอัตราการเจริญเติบโตค่อนข้างต่ำ ซึ่งส่งผลต่อการดูดดึงสังกะสีด้วย

4.3.6 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินหลังการเก็บเกี่ยว

1) ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

1.1) ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

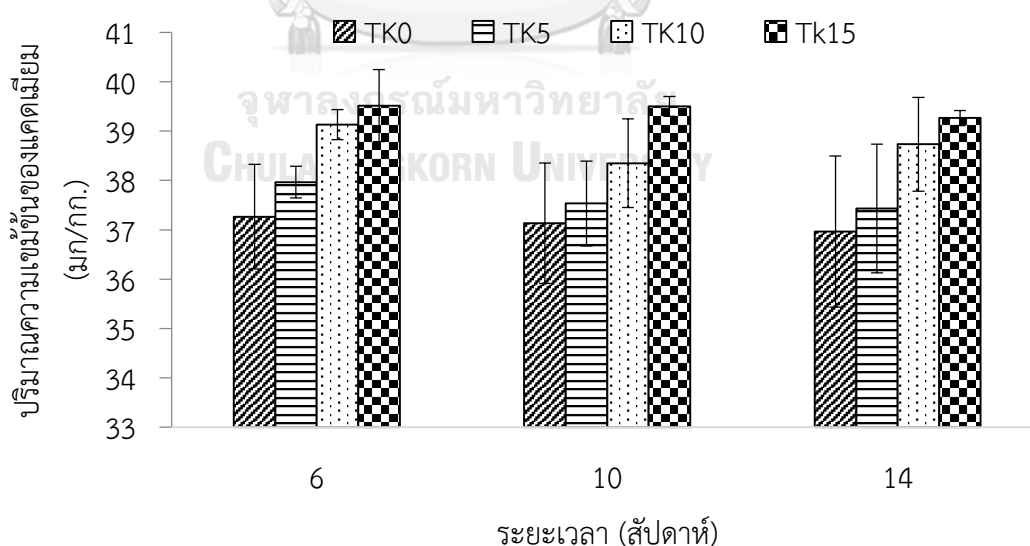
ผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในดินปนเปื้อนในแต่ละชุดการทดลอง พบว่าทุกชุดการทดลองมีปริมาณการสะสมแคดเมียมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยความเข้มข้นของแคดเมียมในดินมีค่าอยู่ระหว่าง 36.13-39.52 mg/kg โดยค่าความเข้มข้นสูงสุดพบที่ชุดการทดลองที่ TK15 และค่าต่ำสุดพบที่ชุดการทดลอง TK0 (ตารางที่ 27) จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าฟงกระดุกหมูที่ใส่ลงไปดินนั้นสามารถยับยั้งหรือขัดขวางการเคลื่อนที่ของแคดเมียมไปสู่ต้นข้าวได้ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Chen, Zhu และ McKay (2006) ที่ได้ทำการศึกษาผลของการเติมถ่านกระดุกหมูต่อปริมาณตะกั่วในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ ซึ่งผลการศึกษาพบว่า การเติมถ่านกระดุกลงไปดินปนเปื้อนตะกั่ว

นั้นสามารถลดปริมาณตะกั่วในดินและลดการดูดดึงตะกั่วในผักกาดขาวได้ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเติมว่าผงกระดูกมีศักยภาพในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วได้ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการสะสมแคดเมียมตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างพบว่า มีแนวโน้มที่ลดลง การที่ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินลดลงนี้ เนื่องจากในดินอาจมีแคดเมียมไอออนที่อยู่ในรูปของสารละลายดิน (Soil Solution) ทำให้พืชมีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมไอออนและเคลื่อนที่ไปสะสมยังส่วนต่างๆ ของข้าวได้ จึงส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินมีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 27 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินหลังการเพาะปลูกในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน (mg/kg)		
	สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14
TK0	37.27 ^a ±1.06	37.13 ^a ±1.22	36.97 ^a ±1.53
TK5	37.97 ^{ab} ±0.32	37.53 ^{ab} ±0.86	37.43 ^{ab} ±1.31
TK10	39.13 ^{ab} ±0.31	38.35 ^{ab} ±0.09	38.73 ^{ab} ±0.95
TK15	39.52 ^c ±0.73	39.50 ^b ±0.20	39.27 ^b ±0.15

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 39 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินหลังการเพาะปลูกในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

1.2) ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในดินหลังการเก็บเกี่ยวพบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในดินในแต่ละชุดการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินมีค่าระหว่าง 32.27.-37.63 mg/kg โดยค่าความเข้มข้นสูงสุดพบที่ชุดการทดลอง TK15 และค่า TK0 (ตารางที่ 28) ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกันกับฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

ตารางที่ 28 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินหลังการเพาะปลูก ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน (mg/kg)		
	สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14
RE0	ND	ND	ND
TK0	35.50±2.55	-	-
TK5	36.05±2.47	-	-
TK10	36.70*	-	-
TK15	37.80*	-	-

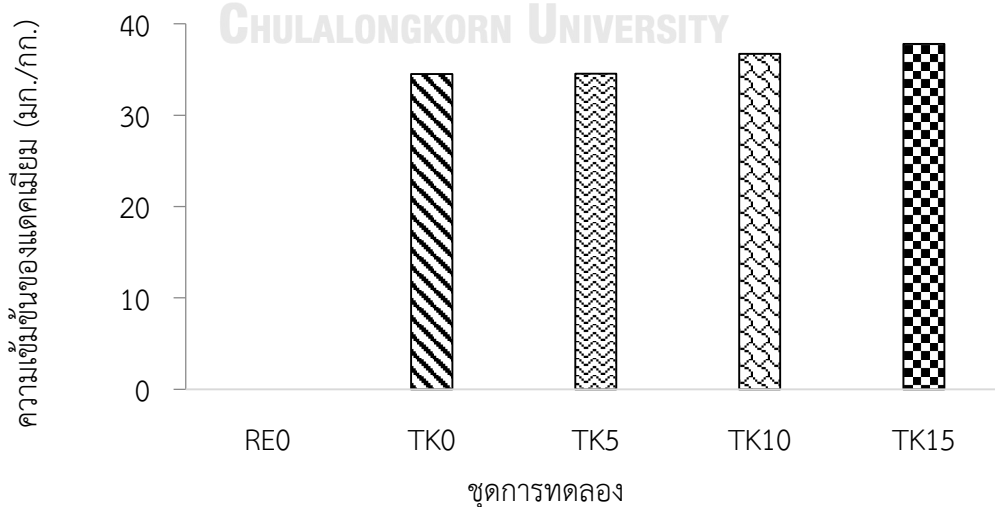
หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ND หมายถึง ปริมาณน้อยมาจนไม่สามารถวัดค่าได้

* หมายถึง มีเพียง 2 ตัวอย่าง เนื่องจากพืชตาย จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติได้

** หมายถึง มีเพียง 1 ตัวอย่าง เนื่องจากพืชตาย ทำให้ไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยได้

- หมายถึง ไม่มีข้อมูลเนื่องจากพืชตาย



รูปที่ 40 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินหลังการเพาะปลูกในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

2) ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้

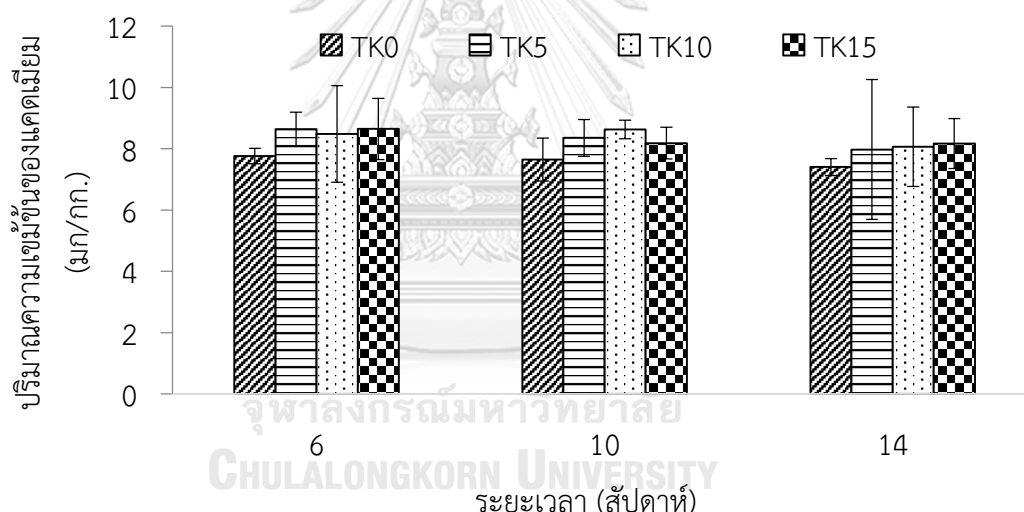
2.1 ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

ผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวพบว่า ในชุดการทดลอง RE0 ซึ่งเป็นดินที่ไม่ปนเปื้อนแคดเมียมและไม่ใส่ผงกระดูก มีปริมาณแคดเมียมน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดค่าได้ สำหรับในชุดการทดลอง TK0, TK5, TK10 และ TK15 ซึ่งเป็นดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมผงกระดูกในอัตราส่วนต่าง ๆ นั้น พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 43) และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างกันระหว่างชุดการทดลองพบว่า ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเติมผงกระดูกหมู่ที่เพิ่มขึ้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ระหว่างชุดการทดลอง TK0, TK5 และ TK10 ยกเว้นในชุดการทดลอง TK15 ซึ่งพบว่ามีค่าความแตกต่างจากชุดการทดลองอื่นๆ โดยความเข้มข้นของแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ในดินมีค่าระหว่าง 7.40-8.65 mg/kg โดยค่าความเข้มข้นสูงสุดพบที่ชุดการทดลอง TK15 และค่าต่ำสุดพบที่ชุดการทดลอง TK0 (ตารางที่ 29) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมผงกระดูกหมู่สามารถทำให้ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชดูดตั้งได้มีในดินค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Siebers, 2009) ที่ได้ศึกษาผลของการเติมฟอสเฟตต่อการตรึงแคดเมียมในดิน ได้สรุปผลการทดลองว่าการเติมฟอสเฟตมีผลทำให้พีเอชของดินเพิ่มขึ้น และดูดซับแคดเมียมไว้ในดินเพิ่มขึ้น มีผลทำให้พืชดูดตั้งแคดเมียมได้น้อยลง และยังสอดคล้องกับผลการทดลองในตารางที่ 23 ซึ่งก็พบว่าปริมาณแคดเมียมในพืชลดลงเมื่อมีการเติมผงกระดูกมากขึ้น ผงกระดูกหมู่มีประกอบสำคัญคือ แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ Beevers (1945) อ้างถึงใน สุดารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์ (2551) ซึ่งก็คือสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตรูปแบบหนึ่งของฟอสเฟตที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดทั้งไอออนบวกและไอออนลบ จึงทำให้ผงกระดูกสามารถดูดซับโลหะหนักได้ (Biomin, 2004 ; Ko et al, 2004) Valsami-Jones et al., (1998) ได้กล่าวไว้ว่า โครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทต์มีลักษณะเป็นผลึกแบบคริสตัลค่อนข้างต่ำ ซึ่งเหมาะสมต่อการบำบัดดินที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก

ตารางที่ 29 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวใน
ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมในดิน (mg/kg)		
	สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14
TK0	7.76±0.25 ^a	7.65±0.70 ^a	7.40±0.28 ^a
TK5	8.64±0.56 ^{ab}	8.35±0.60 ^{ab}	7.97±2.28 ^{ab}
TK10	8.48±1.57 ^{ab}	8.63±0.30 ^b	8.06±1.29 ^{ab}
TK15	8.65±1.00 ^b	8.18±0.52 ^b	8.17±0.82 ^b

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 41 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

2.2 ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวพบว่า ในชุดการทดลอง RE0 ซึ่งเป็นดินที่ไม่ปนเปื้อนแคดเมียมและไม่ใส่ผงกระดูก มีปริมาณแคดเมียมน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดค่าได้ สำหรับในชุดการทดลอง TK0, TK5, TK10 และ TK15 ซึ่งเป็นดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมผงกระดูกในอัตราส่วนต่าง ๆ นั้น พบว่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการเติมผงกระดูกที่เพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นของแคดเมียมในดินมีค่าระหว่าง 7.05-7.74 mg/kg โดยค่า

ความเข้มข้นสูงสุดพบที่ชุดการทดลองที่ใส่ผงกระดูกหมู TK15 และค่าต่ำสุดพบที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่ผงกระดูกหมู TK0 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 และฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 พบว่า ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินหลังการทดลองมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากใช้ดินเดิมจากการเพาะปลูกในครั้งที่ 1 นั้นพืชดูดได้ดูดดึงแคดเมียมไปตามส่วนต่างๆของพืช จึงทำให้แคดเมียมคงเหลือในดินลดลง

ตารางที่ 30 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชดูดดึงได้ในดิน (mg/kg)		
	สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14
RE0	ND	ND	ND
TK0	7.05±0.11*	-	-
TK5	7.42±0.13*	-	-
TK10	7.56**	-	-
TK15	7.74**	-	-

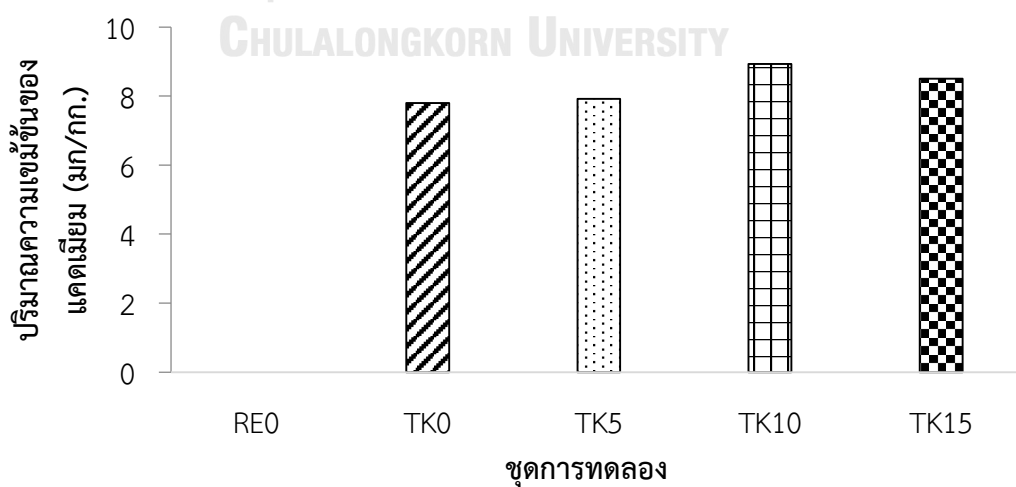
หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ND หมายถึง ปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถวัดค่าได้

* หมายถึง มีเพียง 2 ตัวอย่าง เนื่องจากพืชตาย จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติได้

** หมายถึง มีเพียง 1 ตัวอย่าง เนื่องจากพืชตาย ทำให้ไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยได้

- หมายถึง ไม่มีข้อมูลเนื่องจากพืชตาย



รูปที่ 42 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชดูดดึงได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

4.3.7 ปริมาณการสะสมสังกะสีในดินหลังการเก็บเกี่ยว

1) ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน

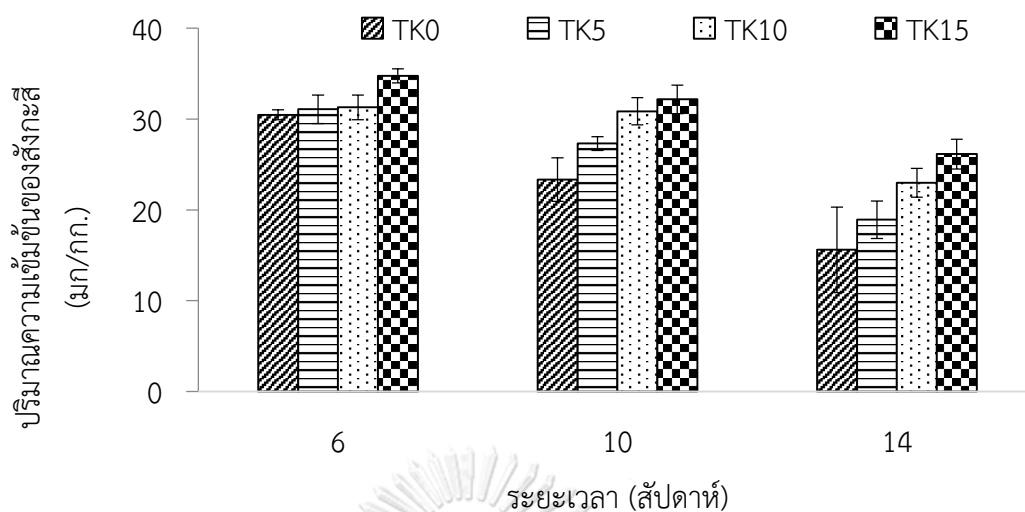
1.1 ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

การศึกษาปริมาณการสะสมสังกะสีทั้งหมดในดิน แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ TK0, TK5, TK10 และ TK15 จากผลการศึกษา พบว่า ความเข้มข้นของสังกะสีในดินมีค่าระหว่าง 998.72-962.68 mg/kg ค่าความเข้มข้นสูงสุดพบที่ชุดการทดลอง TK15 และค่าต่ำสุดพบที่ชุดการทดลอง TK0 ปริมาณการสะสมสังกะสีมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง แต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมผงกระดูกหมูไม่มีผลต่อการสะสมสังกะสีทั้งหมดในดิน ดังแสดงในตารางที่ 31

ตารางที่ 31 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

ชุดการทดลอง	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน (mg/kg)		
	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14
TK0	1092.48 ^a ± 56.84	1155.61 ^a ± 18.62	1149.02 ^a ± 14.49
TK5	1156.16 ^a ± 25.20	1156.12 ^a ± 14.18	1167.47 ^a ± 11.94
TK10	1176.07 ^a ± 6.61	1158.61 ^a ± 37.99	1170.75 ^a ± 16.97
TK15	1179.38 ^a ± 6.13	1163.59 ^a ± 10.01	1161.91 ^a ± 12.81

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวดิ่ง บอความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 43 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

1.2 ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

การศึกษาปริมาณการสะสมสังกะสีทั้งหมดในดิน แบ่งการทดลองออกเป็น 5 ชุดการทดลอง ได้แก่ RE0, TK0, TK5, TK10 และ TK15 จากผลการศึกษาในแต่ละชุดการทดลอง พบว่า ชุดการทดลอง RE0 พบปริมาณการสะสมสังกะสีในดินน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ โดยมีค่าเท่ากับ สำหรับในชุดการทดลอง TK0, TK5, TK10 และ TK15 ซึ่งเป็นชุดการทดลองที่ปลูกในดินปนเปื้อนที่มีการเติมผงกระดูกหมูที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าการสะสมสังกะสีในดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการเติมผงกระดูกที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าอยู่ระหว่าง 859.40-893.90 mg/kg ค่าความเข้มข้นสูงสุดพบที่ชุดการทดลอง TK15 และค่าต่ำสุดพบที่ชุดการทดลอง TK0 ดังแสดงในตารางที่ 32

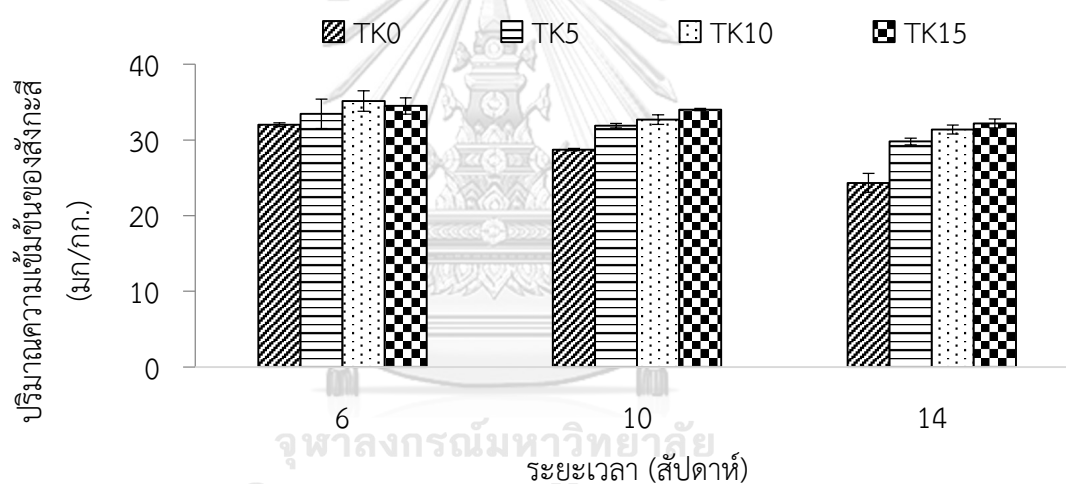
ตารางที่ 32 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ชุดการทดลอง	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน (mg/kg)		
	สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14
RE0	34.78±0.50	34.31±1.05	33.82±0.74
TK0	1117.97±15.19*	-	-
TK5	1143.63±33.70*	-	-
TK10	1169.53**	-	-
TK15	1178.36**	-	-

หมายเหตุ : * หมายถึง มีเพียง 2 ตัวอย่างเนื่องจากพืชตาย จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติได้

** หมายถึง มีเพียง 1 ตัวอย่าง เนื่องจากพืชตาย ทำให้ไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยได้

- หมายถึง ไม่มีข้อมูลเนื่องจากพืชตาย



รูปที่ 44 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

2) ปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้

2.1 ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

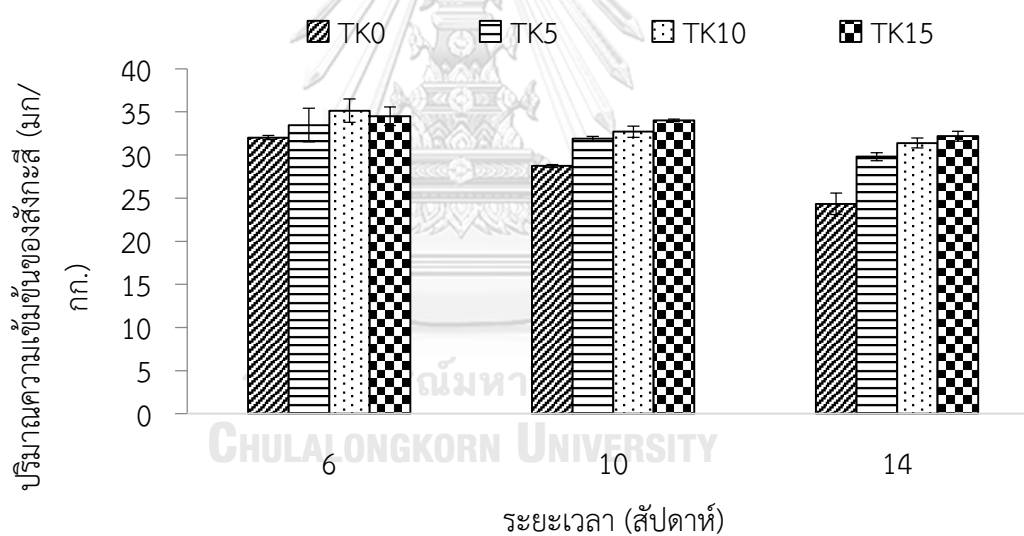
การศึกษาปริมาณการสะสมสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ในดินหลังฤดูการเพาะปลูกที่ 1 แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ TK0, TK5, TK10 และ TK15 จากผลการศึกษา พบว่า ปริมาณการสะสมสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาเก็บเกี่ยว (รูปที่ 47) เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละชุดการทดลองพบว่า ปริมาณการสะสมสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยความ

เข้มข้นของแคดเมียมในดินมีค่าระหว่าง 8.95.-34.76 mg/kg ค่าความเข้มข้นสูงสุดพบที่ชุดการทดลอง TK15 และค่าต่ำสุดพบที่ชุดการทดลอง TK0 ดังแสดงในตารางที่ 33

ตารางที่ 33 ปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

ชุดการทดลอง	ปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ในดิน (mg/kg)		
	สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14
TK0	32.03 ^a ±0.25	28.73 ^a ±0.15	24.34 ^a ±1.25
TK5	33.47 ^{ab} ±1.94	31.89 ^b ±0.28	29.81 ^b ±0.45
TK10	35.14 ^{ab} ±2.07	32.70 ^c ±0.65	31.39 ^c ±0.58
TK15	34.50 ^b ±1.09	34.02 ^d ±0.14	32.19 ^c ±0.58

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์



รูปที่ 45 ปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

2.2 ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ผลการศึกษาปริมาณการสะสมสังกะสีในรูปที่พืชดูดตั้งได้ในดินไม่ปนเปื้อน (ดินนา) พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการเติมผงกระดูกที่เพิ่มมากขึ้น แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ในส่วนผลการศึกษาปริมาณการสะสมสังกะสีในรูปที่พืชดูดตั้งได้ในดินปนเปื้อนในแต่ละชุดการทดลองที่มีการใส่ผงกระดูกหมูในปริมาณ 0%, 5%, 10% และ 15% พบว่าปริมาณการสะสมสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงกระดูกที่เพิ่ม

สูงขึ้นโดยความเข้มข้นของแคดเมียมในดินมีค่าระหว่าง 30.36.-32.96 mg/kg โดยค่าความเข้มข้นสูงสุดพบที่ชุดการทดลองที่ใส่ผงกระดูกหมู 15% และค่าต่ำสุดพบที่ชุดการทดลองที่ไม่ใส่ผงกระดูกหมู (0%)

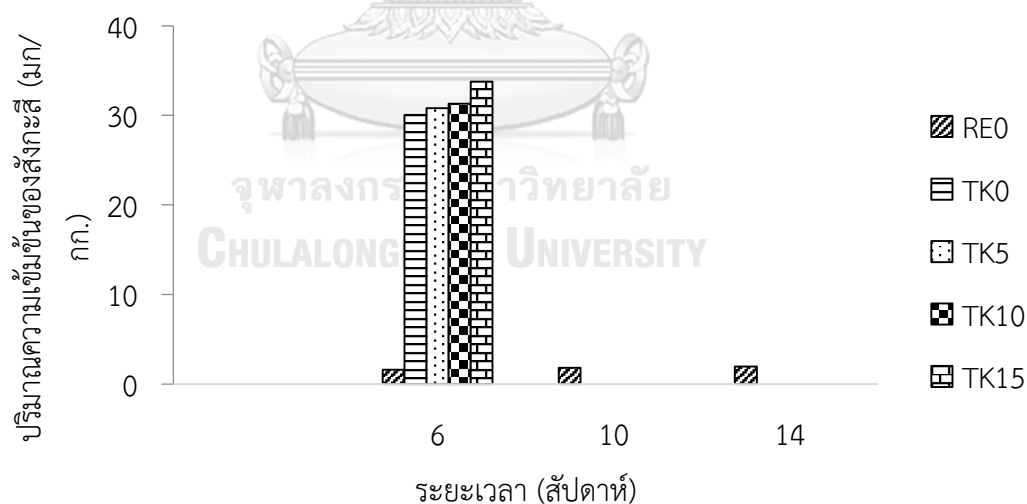
ตารางที่ 34 ปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูการเพาะปลูกที่ 2

ชุดการทดลอง	ปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้ในดิน (mg/kg)		
	สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14
RE0	1.61±0.51	1.83±0.16	1.96±0.06
TK0	30.06±0.42*	-	-
TK5	30.80±0.39*	-	-
TK10	31.29**	-	-
TK15	33.76**	-	-

หมายเหตุ : * หมายถึง มีเพียง 2 ตัวอย่างเนื่องจากพืชตาย จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติได้

** หมายถึง มีเพียง 1 ตัวอย่าง เนื่องจากพืชตาย จึงทำให้ไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยได้

- หมายถึง ไม่มีข้อมูลเนื่องจากพืชตาย



รูปที่ 46 ปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชดูดตั้งได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวในฤดูการเพาะปลูกที่ 2

4.4 ค่า TF และ BCF ของข้าวขาวดอกมะลิ 105

การประเมินความสามารถของข้าวดอกมะลิ 105 ในการสะสมและเคลื่อนย้ายแคดเมียมและสังกะสีนั้น จะพิจารณาจากค่า bioconcentration factor (BCF) และค่า translocation factor (TF) การวิเคราะห์หาค่า BCF โดยค่า BCF จะใช้ในการอธิบายความสามารถของพืชในการเคลื่อนย้ายโลหะจากดินบริเวณรอบๆเข้ามาสู่รากพืช (Yoon และคณะ, 2006) จากตารางที่ 31 เป็นการแสดงค่า BCF และ TF ของแคดเมียมและสังกะสีในระหว่างการเพาะปลูกในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ค่า BCF_{Cd} จะเพิ่มขึ้นเมื่อพืชเจริญเติบโตมากขึ้น โดยเฉพาะในสัปดาห์ที่ 14 ในชุดการทดลอง TK0 ซึ่งเป็นชุดการทดลองจากดินปนเปื้อนที่ไม่เติมผงกระดูกหมู พบว่ามีค่า BCF_{Cd} มากกว่า 1 ซึ่งสามารถจัดจำแนกได้ว่าข้าวดอกมะลิ 105 นั้นว่าอยู่ในกลุ่ม metal hyperaccumulator (Upatham, E.S. และคณะ, 2015 และ Baker, A.J.M. และ Brooks, R.R., 1989) ในขณะที่ค่า BCF_{Cd} มีค่าลดลงตามอัตราการเติมผงกระดูกหมูที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเติมผงกระดูกหมูจะทำให้ลดค่า BCF_{Cd} และ ลดการสะสมแคดเมียมเข้าสู่รากของข้าวดอกมะลิ 105 ได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่า BCF_{Zn} และ BCF_{Cd} พบว่า ค่า BCF_{Zn} มีค่าน้อยกว่า ค่า BCF_{Cd} ในทุกชุดการทดลอง

สำหรับค่าความสามารถในการเคลื่อนย้ายโลหะ (TF) จะอธิบายถึงความสามารถของพืชในการเคลื่อนย้ายโลหะจากรากสู่ลำต้นเหนือดิน จากผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่าค่า TF_{Cd} ลดลงตามระยะเวลาของการเจริญเติบโตของพืช โดยมีค่าน้อยกว่า 1 ในทุกชุดการทดลอง เนื่องจากความเป็นพิษของแคดเมียมจะไปจำกัดการเคลื่อนย้ายแคดเมียมและสังกะสีจากรากสู่ลำต้น เมื่อเปรียบเทียบค่า TF ของอัตราการเติมผงกระดูกหมูในแต่ละชุดการทดลอง พบว่า ทั้งค่า TF_{Cd} และ TF_{Zn} มีแนวโน้มลดลงตามอัตราการเติมผงกระดูกหมูที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่าผงกระดูกหมูมีความสามารถในการลดหรือยับยั้งการเคลื่อนที่ของโลหะจากรากสู่ลำต้นได้

จากการศึกษาในครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีความสามารถในการสะสมแคดเมียมไว้ในรากพืชได้สูง ในขณะที่ผงกระดูกหมูมีความสามารถในการลดหรือยับยั้งการเคลื่อนที่ของโลหะจากรากสู่ลำต้นได้

ตารางที่ 35 ค่า BCF และ TF ของแคดเมียมและสังกะสีในต้นข้าวดอกมะลิ 105 ที่มีการเติมผง
กระดูกหมูในอัตราส่วนต่างๆในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

โลหะหนัก	ค่า	ชุดการทดลอง	สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14		
แคดเมียม	BCF	TK0	0.61 ^c ±0.06	0.87 ^c ±0.05	1.04 ^c ±0.06		
		TK5	0.25 ^b ±0.05	0.28 ^b ±0.01	0.34 ^b ±0.09		
		TK10	0.22 ^b ±0.04	0.22 ^{ab} ±0.07	0.23 ^a ±0.02		
		TK15	0.11 ^a ±0.02	0.18 ^a ±0.01	0.19 ^a ±0.01		
	TF	TK0	0.60 ^b ±0.08	0.43 ^b ±0.02	0.38 ^b ±0.10		
		TK5	0.21 ^a ±0.03	0.19 ^a ±0.06	0.16 ^a ±0.05		
		TK10	0.18 ^a ±0.02	0.21 ^a ±0.08	0.18 ^a ±0.03		
		TK15	0.30 ^a ±0.10	0.21 ^a ±0.03	0.20 ^a ±0.02		
		สังกะสี	BCF	TK0	0.47 ^b ±0.02	0.50 ^b ±0.03	0.38 ^b ±0.03
				TK5	0.23 ^a ±0.01	0.23 ^a ±0.02	0.21 ^a ±0.02
TK10	0.21 ^a ±0.02			0.22 ^a ±0.02	0.19 ^a ±0.02		
TK15	0.19 ^a ±0.01			0.20 ^a ±0.03	0.17 ^a ±0.02		
TF	TK0		0.23 ^a ±0.05	0.23 ^a ±0.03	0.27 ^a ±0.05		
	TK5		0.32 ^a ±0.03	0.35 ^b ±0.04	0.27 ^a ±0.13		
	TK10		0.39 ^a ±0.16	0.33 ^b ±0.04	0.32 ^a ±0.05		
	TK15		0.32 ^a ±0.01	0.32 ^b ±0.02	0.26 ^a ±0.09		

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ
ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จากตารางที่ 36 เป็นการแสดงค่า BCF และ TF ของแคดเมียมและสังกะสีในระหว่างการ
เพาะปลูกในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 จากผลการศึกษาก็ให้เห็นว่า ทั้งค่า BCF_{Cd} และ BCF_{Zn} มีค่าน้อย
กว่า 1 ในทุกชุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบค่า BCF_{Cd} และ BCF_{Zn} พบว่า ค่า BCF_{Cd} มีค่าสูงกว่า
BCF_{Zn}

สำหรับค่าความสามารถในการเคลื่อนย้ายโลหะ (TF) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าทั้งค่า
TF_{Cd} และ TF_{Zn} ลดลงตามอัตราการเติมผงกระดูกหมูที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าผงกระดูกหมูมี
ความสามารถในการลดหรือยับยั้งการเคลื่อนที่ของโลหะจากรากสู่ลำต้นได้

ตารางที่ 36 ค่า BCF และ TF ของแคดเมียมและสังกะสีในต้นข้าวดอกมะลิ 105 ที่มีการเติมผง
กระดูกหมูในอัตราส่วนต่างๆในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

โลหะหนัก	ค่า	ชุดการทดลอง	สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 10	สัปดาห์ที่ 14
แคดเมียม	BCF	RE0	-	-	-
		TK0	0.29-0.39*	-	-
		TK5	0.08-0.14*	-	-
		TK10	0.16**	-	-
		TK15	0.09**	-	-
	TF	RE0	-	-	-
		TK0	0.59-0.91*	-	-
		TK5	0.26-0.46*	-	-
		TK10	0.21**	-	-
		TK15	0.26**	-	-
สังกะสี	BCF	RE0	0.30±0.02	0.34±0.03	0.49±0.02
		TK0	0.08*	-	-
		TK5	0.04*	-	-
		TK10	0.03**	-	-
		TK15	0.03**	-	-
	TF	RE0	0.40±0.26	0.60±0.13	0.49±0.04
		TK0	0.61-0.63*	-	-
		TK5	0.55-0.65*	-	-
		TK10	0.50**	-	-
		TK15	0.54**	-	-

4.5 สมดุลมวลของแคดเมียม

สมดุลมวลของแคดเมียมเมื่อเริ่มการทดลองและหลังการทดลองของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระดับการเติมผงกระดูกที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 37 ปริมาณแคดเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 207 มิลลิกรัม/กระถาง ปริมาณแคดเมียมในต้นข้าวทั้งหมดคิดเทียบเป็นมิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้ง และ ปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ในดินคิดเป็นมิลลิกรัมต่อกระถาง

ตารางที่ 37 สมดุลมวลแคดเมียมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระดับการเติมผงกระดูกในอัตรา ที่แตกต่างกันในการเพาะปลูกที่ 1

โลหะหนัก	ชุดการทดลอง	โลหะหนัก ทั้งหมดในดิน (%)	โลหะหนัก ทั้งหมดในพืช (%)	รวม (%)	โลหะหนัก ที่หายไป (%)
แคดเมียม	TK0	89.29	0.80	90.09	9.91
	TK5	90.42	0.21	90.61	9.37
	TK10	93.56	0.18	93.74	6.26
	TK15	94.85	0.18	95.03	4.97
สังกะสี	TK0	96.41	0.43	96.84	3.16
	TK5	97.96	0.23	98.19	1.81
	TK10	98.23	0.18	98.41	1.59
	TK15	97.54	0.13	97.67	2.33

จากผลการศึกษาสมดุลมวลของแคดเมียมและสังกะสีสำหรับฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีหายไปจากตอนเริ่มต้นคิดเป็นสัดส่วนที่หายไป 4.97-9.91 % และ 1.59-3.16 % ตามลำดับ โดยสัดส่วนทั้งแคดเมียมและสังกะสีที่หายไปมากที่สุด พบในชุดการทดลองที่ TK0 สัดส่วนที่หายไปน้อยที่สุดพบในชุดการทดลอง TK15 (สำหรับแคดเมียม) และ TK10 (สำหรับสังกะสี)

ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ชุดการทดลอง TK0, TK5 TK10 และ TK15 เท่ากับ 0.18-0.80% และ 0.41-1.81% ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ข้าวในชุดการทดลอง TK15 ที่เติมผงกระดูกหมู 15% สามารถยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมในดินได้มากกว่าที่ชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากมีการสะสมแคดเมียมในต้นข้าวทั้งหมด (%) น้อยที่สุด

ปริมาณสังกะสีที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ชุดการทดลอง RE0, TK0, TK5 TK10 และ TK15 เท่ากับ 0.18-0.36% และ 0.01-0.64% ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ข้าวในชุดการทดลอง TK15 ที่เติมผงกระดูกหมู 15% สามารถยับยั้งการดูดดึง

แคดเมียมในดินได้มากกว่าที่ชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากมีการสะสมสังกะสีในต้นข้าวทั้งหมด (%) น้อยที่สุด

ดังนั้นผงกระดูกหมูจึงสามารถยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีที่ปนเปื้อนในดินของข้าวได้ โดยในเมล็ดข้าวมีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ของสำนักงานอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา คือ 0.2 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัม จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่จริงได้

ตารางที่ 38 สมดุลมวลแคดเมียมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระดับการเติมผงกระดูกในอัตราที่แตกต่างกันในการเพาะปลูกที่ 2

โลหะหนัก	ชุดการทดลอง	โลหะหนักทั้งหมดในดิน		รวม (%)	โลหะหนักที่หายไป (%)
		(%)	โลหะหนักทั้งหมดในพืช (%)		
แคดเมียม	TK0	96.80	1.81	98.61	1.39
	TK5	95.16	0.43	95.59	4.41
	TK10	93.15	0.57	92.58	7.42
	TK15	94.26	0.41	94.85	5.15
สังกะสี	RE0	93.32	0.64	93.96	6.04
	TK0	98.92	0.02	98.94	1.06
	TK5	97.19	0.01	97.20	2.8
	TK10	98.91	0.01	98.92	1.08
	TK15	99.76	0.01	99.25	0.75

จากผลการศึกษาสมดุลมวลของแคดเมียม พบว่า ข้าวดอกมะลิ 105 มีปริมาณแคดเมียมในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 หายไปจากตอนเริ่มต้นการทดลอง เท่ากับ 1.39-7.42%

จากผลการศึกษาสมดุลมวลของแคดเมียมและสังกะสีสำหรับฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณแคดเมียมและสังกะสีหายไปจากตอนเริ่มต้นคิดเป็นสัดส่วนที่หายไป 4.97-9.91 % และ 1.59-3.16 % ตามลำดับ โดยสัดส่วนทั้งแคดเมียมและสังกะสีที่หายไปมากที่สุดพบในชุดการทดลองที่ TK0 สัดส่วนที่หายไปน้อยที่สุดพบในชุดการทดลอง TK15 (สำหรับแคดเมียม) และ TK10 (สำหรับสังกะสี)

ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ชุดการทดลอง TK0, TK5 Tk10 และ TK15 เท่ากับ 0.18-0.80% และ 0.41-1.81% ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 และ 2

ตามลำดับ ข้าวในชุดการทดลอง TK15 ที่เติมผงกระดูกหมู 15% สามารถยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมในดินได้มากกว่าที่ชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากมีการสะสมแคดเมียมในต้นข้าวทั้งหมด (%) น้อยที่สุด

ปริมาณสังกะสีที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ชุดการทดลอง RE0, TK0, TK5 Tk10 และ TK15 เท่ากับ 0.18-0.36% และ 0.01-0.64% ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ข้าวในชุดการทดลอง TK15 ที่เติมผงกระดูกหมู 15% สามารถยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมในดินได้มากกว่าที่ชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากมีการสะสมสังกะสีในต้นข้าวทั้งหมด (%) น้อยที่สุด

มีหลายกลไกที่จะนำมาใช้ในการอธิบายการลดการเคลื่อนที่ของโลหะที่อยู่ในดิน ได้แก่ การดูดซับไว้ที่ผิว การตกตะกอน และการรวมตัวเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Bolan et al, 2014) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้กระดูกเป็นสารดูดซับ ศึกษาหมู่ฟังก์ชันนัลกรุปด้วย FTIR และศึกษาหาองค์ประกอบธาตุด้วย XRF ซึ่งจากการศึกษาชี้ชัดว่ากระดูกนั้นมีกลุ่มของฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งกลุ่มฟอสเฟตที่อยู่ในกระดูกนี้สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะหนักและส่งผลทำให้โลหะหนักตกตะกอน และลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักได้ (Chen et al, 2006) นอกจากนั้นพื้นที่ผิวสัมผัสของอนุภาคผงกระดูกมีลักษณะที่ขรุขระและมีรูเป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้จึงเหมาะสำหรับการดูดติดผิวและรวมถึงการลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักได้

นอกจากนี้ จากการศึกษาโครงสร้างของผงกระดูกหมูทั้งก่อนและหลังการดูดซับพบว่ากระบวนการในการดูดซับแคดเมียมในสารละลายไม่ได้ทำให้โครงสร้างหลัก คือ ไฮดรอกซีอะพาไทต์เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากไม่พบพีคที่เด่นชัด ดังนั้นกลไกการกำจัดจึงสามารถยืนยันได้ว่าเป็นกลไกการดูดติดผิวและติดค้างภายในรูพรุน

อีกหนึ่งเหตุผลสำคัญของกลไกการดูดซับคือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่เป็นอีกองค์ประกอบหลักในกระดูก ซึ่งส่งผลให้ดินมีคุณสมบัติเป็นด่าง ซึ่งการเปลี่ยนพีเอชของน้ำในโพรงดินและดินได้ ส่งผลให้เกิดกลไกการลดหรือเพิ่มการเคลื่อนที่ของตะกั่วที่อยู่ในดินได้ ดังนั้น pH ก็ถือเป็นอีกหนึ่งบทบาทที่สำคัญในการส่งผลให้โลหะสามารถลดหรือเพิ่มการเคลื่อนที่ของโลหะสู่พืชได้ (Cotter-Howells, 1996)

Li และคณะ (2018) ศึกษาการลดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินด้วยการใช้สารผสมของ illite/smectite clay ร่วมกับถ่านกระดูก จากการศึกษาพบว่าถ่านกระดูกสามารถลดการเคลื่อนที่ของโลหะในดินได้ด้วยกระบวนการรวมตัวของโลหะและฟอสเฟต Huang et al., 2006 ใช้ถ่านกระดูกในอัตรา 1.6% เพื่อลดการเคลื่อนที่ของตะกั่วในดินและพบว่าถ่านกระดูกสามารถลดการดูดดึงตะกั่วขึ้นสู่รากข้าวลงได้ถึง 45.8% Chen et al., (2006) ก็พบเช่นเดียวกันว่า ถ่านกระดูกสามารถลดความเข้มข้นของตะกั่วในลำต้นและรากของผักกาดขาวลงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของการเติมผงกระดูกหมูในการยับยั้งการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินของข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยศึกษาในดิน 5 ชุดการทดลอง ได้แก่ RE0, TK0, TK5, TK10 และ TK15 ทำการเพาะปลูก 2 ฤดูกาล เก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 6, 10 และ 14 สัปดาห์ ซึ่งผลผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของผงกระดูกหมู

ผงกระดูกหมูต้มมีลักษณะพื้นผิวเป็นชั้นๆ ขรุขระ มีพื้นที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนต้ม ซึ่งสรุปได้ว่าการต้มมีส่วนทำให้ลักษณะทางกายภาพของกระดูกเปลี่ยนแปลงไป โดยจะเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลของผลกระดูกหมูสดและกระดูกหมูที่ผ่านการต้มพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดเพิ่มขึ้นจาก $0.86 \text{ m}^2/\text{g}$ เป็น $3.49 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรทั้งหมดของโพรงเพิ่มขึ้นจาก $0.0009 \text{ cm}^3/\text{g}$ เป็น $0.0107 \text{ cm}^3/\text{g}$ และผงกระดูกหมูที่ผ่านการต้มจะมีขนาดโพรงเฉลี่ยสูงกว่าผงกระดูกหมูสด 2.8 เท่า (จาก 43.64 \AA เป็น 122.9 \AA) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอนุภาคในการต้มสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของสารดูดซับ เนื่องจากความร้อนจะไปทำลายสารประกอบอินทรีย์ที่ติดอยู่บนผิวของสารดูดซับและทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ผลการศึกษาโครงสร้างของผงกระดูกหมูพบว่า โครงสร้างผลึกมีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ โดยไอออนแคดเมียมส่วนหนึ่งจะเข้าไปแทนที่ไอออนแคลเซียมในผงกระดูกหมู

5.1.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับสารละลายแคดเมียมของผงกระดูกหมู

ผงกระดูกหมูที่ 0.02 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมที่ 10 mg/L เวลาสัมผัส 60 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมสูงสุด คือ mg/g ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์เหมาะสมกว่าแบบฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่า และมีความชันกราฟมากกว่า จึงเป็นระบบดูดซับที่ผิวของสารดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer)

5.1.3 ผลของผงกระดุกหมูต่อการเจริญเติบโตของข้าวขาวดอกมะลิ 105

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 ข้าวเติบโตได้ดี และออกรวงในทุก ระดับความเข้มข้น และมีแนวโน้มสูงขึ้นตามระยะเวลาการปลูกที่นานขึ้น ความสูงอยู่ในช่วง 119.20-126.27 เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบความสูงตามอัตราการเติมผงกระดุกหมูที่สัปดาห์ที่ 14 พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันทุกชุดการทดลอง โดยค่าที่มากที่สุดอยู่ที่ชุดการทดลอง TK5 ขณะที่ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2 ข้าวเริ่มมีเจริญเติบโตได้ค่อนข้างต่ำ และเจริญเติบโตได้เพียงในระยะ 4 สัปดาห์แรก หลังจากนั้นเกิดอาการต้นเหลืองและยืนต้นตาย ยกเว้นในชุดการทดลอง RE0 ที่สามารถเจริญเติบโตได้จนครบ 14 สัปดาห์ เมื่อเปรียบเทียบความสูงของข้าวตามระยะเวลาการปลูกพบว่า มีแนวโน้มสูงขึ้นตามระยะเวลาการปลูกที่นานขึ้น

5.1.4 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าว

การสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆของข้าว มีการสะสมแคดเมียมเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการปลูกที่นานขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.13-38.50 mg/kg และ 0.90-12.08 mg/kg ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยพบในส่วนรากมากที่สุด รองลงมา คือ ลำต้น ใบ เมล็ด และเปลือก ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในส่วนต่างๆของข้าวตามอัตราการเติมผงกระดุกหมูในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 พบว่า ทุกชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ยกเว้นในชุดการทดลอง TK0 (ชุดควบคุม) ที่มีการสะสมแคดเมียมสูงที่สุดที่ทุกระยะการทดลอง ทั้งในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 และ 2

5.1.5 ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนต่างๆของข้าว

การสะสมสังกะสีในส่วนต่างๆของข้าว มีปริมาณการสะสมสังกะสีเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการปลูกที่นานขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 8.20-570.00 mg/kg ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 และ 2 ตามลำดับ และ โดยพบในส่วนรากมากที่สุด รองลงมา คือ ลำต้น ใบ เมล็ด และเปลือก ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนต่างๆของข้าวตามอัตราการเติมผงกระดุกหมูในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 พบว่า ทุกชุดการทดลองมีการสะสมสังกะสีไม่แตกต่างกันทางสถิติ ยกเว้นในชุดการทดลองควบคุม TK0 (ชุดควบคุม) ที่มีการสะสมแคดเมียมและสังกะสีสูงที่สุดที่ทุกระยะการทดลอง ทั้งในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1 และ 2

5.1.5 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%)

ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ชุดการทดลอง TK0, TK5 Tk10 และ TK15 เท่ากับ 0.18-0.80% และ 0.41-1.81% ในฤดูการเพาะปลูกที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ข้าวในชุดการทดลอง TK15 ที่เติมผงกระดูกหมู 15% สามารถยับยั้งการดูดตั้งแคดเมียมในดินได้มากกว่าที่ชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากการสะสมแคดเมียมในต้นข้าวทั้งหมด (%) น้อยที่สุด

ปริมาณสังกะสีที่สะสมในต้นข้าวทั้งหมด (%) ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ชุดการทดลอง RE0, TK0, TK5 Tk10 และ TK15 เท่ากับ 0.18-0.36% และ 0.01-0.64% ในฤดูการเพาะปลูกที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ข้าวในชุดการทดลอง TK15 ที่เติมผงกระดูกหมู 15% สามารถยับยั้งการดูดตั้งแคดเมียมในดินได้มากกว่าที่ชุดการทดลองอื่นๆ เนื่องจากการสะสมสังกะสีในต้นข้าวทั้งหมด (%) น้อยที่สุด

ดังนั้นผงกระดูกหมูจึงสามารถยับยั้งการดูดตั้งแคดเมียมและสังกะสีที่ปนเปื้อนในดินของข้าวได้ โดยในเมล็ดข้าวมีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ของสำนักงานอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา คือ 0.2 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัม จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่จริงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยผลของผงกระดูกหมูในการยับยั้งการดูดตั้งแคดเมียมของขาวดอกมะลิ 105 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้

5.2.1 งานวิจัยนี้ใช้ขนาดของผงกระดูกหมู ≤ 2 มิลลิเมตร เท่านั้น ควรทำการศึกษผลของขนาดผงกระดูกหมูเพิ่มเติม เพื่อดูว่ามีประสิทธิภาพในการยับยั้งการดูดตั้งแคดเมียมในดินที่แตกต่างกันหรือไม่

5.2.2 ควรทำการศึกษาดินที่มีการปนเปื้อนจากพื้นที่อื่นๆ เพราะความแตกต่างของลักษณะดินทำให้ความสามารถในการดูดตั้งแคดเมียมของพืชได้แตกต่างกันด้วย

5.2.3 ศึกษาการดูดซับแคดเมียมในดินของพืชชนิดอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกปลูกพืชต่อไป

5.2.4 ศึกษาผลของโลหะอื่นๆที่อยู่ในดิน ซึ่งอาจมีผลต่อการเจริญเติบโตและการดูดซับโลหะหนักในดิน เช่น สารหนู (Arsenic)





ภาคผนวก ก

ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของผงกระดูกหมูที่สภาวะต่างๆ

ตารางที่ 39 ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของผงกระดูกหมูที่สภาวะต่างๆ

ระยะเวลาสัมผัส (นาทีก)	ประสิทธิภาพในการกำจัด (%)								
	60-3	60-6	60-9	80-3	80-6	80-9	100-3	100-6	100-9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	51.58	52.39	53.54	64.65	68.15	62.55	64.58	67.17	65.08
60	60.31	60.53	59.71	70.85	79.96	71.17	68.98	70.02	74.56
90	58.72	57.69	52.49	65.67	77.32	70.66	67.97	65.13	71.27
120	61.44	59.74	55.72	63.31	76.87	71.78	65.30	60.30	73.21
180	60.92	57.65	58.06	60.83	73.82	68.45	61.30	59.79	70.14
300	59.26	50.52	59.60	59.70	71.83	68.00	56.50	63.63	70.39
1440	56.62	59.66	60.81	60.30	69.16	70.18	57.71	61.46	71.78

ตารางที่ 40 ปริมาณแคดเมียมคงเหลือในสารละลายที่พีเอชต่างๆ

พีเอช	R1	R2	R3
2	5.608	5.616	5.592
3	6.416	6.213	6.292
4	7.285	7.231	7.231
5	8.289	8.287	8.299
6	8.594	8.603	8.601
7	7.932	7.955	7.959
8	7.601	7.625	7.536
9	7.49	7.492	7.512

ตารางที่ 41 ปริมาณแคดเมียมคงเหลือในสารละลายที่พีเอชต่างๆ

พีเอช	R1	R2	R3
2	5.608	5.616	5.592
3	6.416	6.213	6.292
4	7.285	7.231	7.231
5	8.289	8.287	8.299
6	8.594	8.603	8.601
7	7.932	7.955	7.959
8	7.601	7.625	7.536
9	7.49	7.492	7.512

ภาคผนวก ค

ข้อมูลปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในส่วนต่างๆของพืช

ตารางที่ 44 ปริมาณแคดเมียมในส่วนต้นของพืช ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

ชุดการทดลอง	สัปดาห์ที่ 6			สัปดาห์ที่ 10			สัปดาห์ที่ 14		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
TK0	13.50	12.95	14.50	13.65	13.40	14.20	11.30	14.35	18.40
TK5	2.00	2.00	1.90	1.50	1.65	2.85	2.05	1.90	1.65
TK10	1.40	1.60	1.50	1.50	1.90	1.60	1.50	1.70	1.50
TK15	1.30	1.10	1.50	1.65	1.3	1.45	1.60	1.45	1.40

ตารางที่ 45 ปริมาณแคดเมียมในส่วนรากของพืช ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

ชุดการทดลอง	สัปดาห์ที่ 6			สัปดาห์ที่ 10			สัปดาห์ที่ 14		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
TK0	23.38	24.20	21.00	30.80	30.90	35.50	39.4	37.8	38.3
TK5	8.70	11.50	8.00	10.70	10.20	10.90	10.50	11.30	15.70
TK10	7.60	10.40	7.40	11.70	6.40	7.70	9.80	8.10	8.70
TK15	4.30	5.40	3.70	7.20	7.10	6.50	6.90	7.60	7.30

ตารางที่ 46 ปริมาณแคดเมียมในส่วนต่างๆของพืช ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

ชุดการทดลอง	เมล็ด			เปลือก		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
TK0	1.38	1.29	1.45	2.50	3.00	2.70
TK5	0.17	0.20	0.23	0.80	0.80	0.90
TK10	0.15	0.23	0.14	0.60	0.50	0.70
TK15	0.16	0.09	0.15	0.40	0.20	0.30

ตารางที่ 47 ปริมาณแคดเมียมในส่วนต้นของพืช ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2

ชุดการทดลอง	ลำต้น			ราก			เมล็ด		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
RE0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TK0	8.10	9.80	-	12.75	11.40	-	-	-	-
TK5	1.50	1.30	-	3.50	4.50	-	-	-	-
TK10	1.20	-	-	5.70	-	-	-	-	-
TK15	0.90	-	-	3.40	-	-	-	-	-

ตารางที่ 48 ปริมาณสังกะสีในส่วนต้นของพืช ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

ชุดการทดลอง	สัปดาห์ที่ 6			สัปดาห์ที่ 10			สัปดาห์ที่ 14		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
TK0	130.00	90.00	110.00	100.00	130.00	150.00	140.00	110.00	150.00
TK5	33.00	73.70	91.40	91.20	91.40	70.80	89.50	103.10	87.20
TK10	82.40	61.90	65.90	59.60	85.30	131.60	73.50	96.70	80.00
TK15	76.50	49.00	32.20	64.30	73.80	78.90	73.90	92.00	61.00

ตารางที่ 49 ปริมาณสังกะสีในส่วนรากของพืช ในฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1

ชุดการทดลอง	สัปดาห์ที่ 6			สัปดาห์ที่ 10			สัปดาห์ที่ 14		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
TK0	400.00	410.00	430.00	550.00	560.00	530.00	580	540	590
TK5	270.00	220.00	250.00	260.00	280.00	250.00	250.00	270.00	290.00
TK10	230.00	240.00	190.00	220.00	269.00	230.00	260.00	270.00	230.00
TK15	219.00	208.00	177.00	210.00	230.00	240.00	229.00	268.00	207.00

ภาคผนวก ง
ข้อมูลปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในดินหลังการทดลอง

ตารางที่ 52 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินหลังการทดลองตามระยะเวลาการปลูกพืช

ชุดการทดลอง	สัปดาห์ที่ 6			สัปดาห์ที่ 10			สัปดาห์ที่ 14		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1									
TK0	37.10	36.30	38.40	35.80	37.40	38.20	35.80	36.40	38.70
TK5	37.60	38.20	38.10	38.30	36.60	37.70	38.80	37.30	36.20
TK10	39.40	38.80	39.20	38.60	37.35	39.10	38.70	37.80	39.70
TK15	40.10	39.75	38.70	39.70	39.50	39.30	39.30	39.10	39.40
ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2									
RE0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TK0	33.70	37.30							
TK5	37.80	34.30							
TK10	36.70								
TK15	37.80								

ตารางที่ 53 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินหลังการทดลองตามระยะเวลาการปลูกพืช

ชุดการทดลอง	สัปดาห์ที่ 6			สัปดาห์ที่ 10			สัปดาห์ที่ 14		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 1									
TK0	1131.14	1119.08	1027.21	1134.21	1168.11	1164.50	1132.43	1155.44	1159.18
TK5	1176.86	1128.10	1163.53	1169.18	1158.13	1141.04	1154.74	1178.43	1169.23
TK10	1182.43	1176.56	1169.23	1115.31	1186.35	1174.17	1171.47	1153.43	1187.34
TK15	1181.25	1184.36	1172.54	1168.21	1170.46	1152.11	1148.86	1162.40	1174.46
ฤดูกาลเพาะปลูกที่ 2									
RE0	34.21	35.03	35.11	33.11	34.79	35.03	33.06	33.87	34.53
TK0	1118.71	1107.23							
TK5	1167.45	1119.79							
TK10	1169.53								
TK15	1172.36								

- Adriano, D. C. (2001). Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals, 2nd. In: Springer-Verlag, New York.
- Agbontalor. (2007). Phytoremediation: an environmentally sound technology for pollution prevention, control and remediation in developing countries. *Educational Research*, 2(7), 151-156.
- Akkajit, P., & Tongcumpou, C. (2010). Fractionation of metals in cadmium contaminated soil: Relation and effect on bioavailable cadmium. *Geoderma*, 156(3-4), 126-132.
- Alloway, B. J. a. (1995). *Soil processes and the behavior of metals*. In Alloway, B. J., *Heavy metals in Soils*. London: Chapman&Hall.
- Bell, M., Barry, G. A., McLaughlin., & Michael John. (2001). Managing cadmium in summer grain legumes for premium quality produce.
- Bradl, H. (2005). *Heavy metals in the environment: origin, interaction and remediation* (Vol. 6): Elsevier.
- Chaney, R. (1982). *Fate of toxic substances in sludge applied to cropland*. Paper presented at the Proc. Intern. Symp. on Land Application of Sewage Sludge. Association for Utilization of Sewage Sludge, Tokio, Japan.
- Chantana, P., Wittaya, S., Nishijo, M., Werawan, R., & Thawangon, I. (2012). Health risk management for cadmium contamination in Thailand: are challenged overcome. In.
- Chen, S.-B., Zhu, Y.-G., Ma, Y.-B., & McKay, G. (2006). Effect of bone char application on Pb bioavailability in a Pb-contaminated soil. *Environmental Pollution*, 139(3), 433-439.
- Cheung, C., Chan, C. K., Porter, J. F., & McKay, G. (2001). Film-pore diffusion control for the batch sorption of cadmium ions from effluent onto bone char. *Journal of Colloid and Interface Science*, 234(2), 328-336.
- CODEX. (2007). *Codex alimentarius commission: procedural manual*: Food & Agriculture Org. Coporation, E. (2015). Bone Char <http://www.ebonex.com/bapp.htm#water>. (25/06/2015)
- Croes, S., Weyens, N., Janssen, J., Vercampt, H., Colpaert, J. V., Carleer, R., . . . Vangronsveld, J. (2013). Bacterial communities associated with *B. rassaica napus* L. grown on trace element-contaminated and non-contaminated fields: a genotypic and phenotypic comparison. *Microbial biotechnology*, 6(4), 371-384.
- Cunningham, S. D., Anderson, T. A., Schwab, A. P., & Hsu, F. (1996). Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. *Advances in agronomy*, 56(1), 55-114.
- Eevers, N., White, J. C., Vangronsveld, J., & Weyens, N. (2017). Bio-and Phytoremediation of Pesticide-Contaminated Environments: A Review. In *Advances in Botanical Research* (Vol. 83, pp. 277-318): Elsevier.
- Ensley, B. D. (2000). *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*: John Wiley & s Sons, Incorporated.
- Escrig, I., & Morell, I. (1998). Effect of calcium on the soil adsorption of cadmium and zinc in some Spanish sandy soils. *Water, Air, Soil Pollution*, 105(3-4), 507-520.

- Grant, C., Bailey, L., McLaughlin, M., & Singh, B. (1999). Management factors which influence cadmium concentrations in crops. In *Cadmium in soils and plants* (pp. 151-198): Springer.
- Helmke, P. (1999). Chemistry of cadmium in soil solution. In *Cadmium in soils and plants* (pp. 39-64): Springer.
- Irwan, R., Mouwkerik, M. V., Stevens, L. S., M.D., , & Basham, W. (1997). *Environmental contaminants encyclopedia Zinc entry*. Colorado, USA: Water resources division.
- Jiang, W., Liu, D., & Hou, W. (2001). Hyperaccumulation of cadmium by roots, bulbs and shoots of garlic (*Allium sativum* L.). *Bioresource Technology*, 76(1), 9-13.
- Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants*: CRC press.
- Khan, F. I., Husain, T., & Hejazi, R. J. J. o. e. m. (2004). An overview and analysis of site remediation technologies. 71(2), 95-122.
- Ko, D. C., Cheung, C. W., Choy, K. K., Porter, J. F., and, & McKay, G. (2004). Sorption equilibria of metal ions on bone char. *Chemosphere*, 54(3), 273-281.
- Kohnke, H., & Franzmeier, D. P. (1994). *Soil science simplified*: Waveland Press.
- Kolodynska, D., Wnertrzak, R., Leahy, J., Hayes, M., Kwapinski, W., & Hubicki, Z. (2012). Kinetic and adsorptive characterization of biochar in metal ions removal. *Chemical Engineering Journal*, 197, 295-305.
- Lewis, R. A., & Hawley, G. G. (2016). *Hawley's condensed chemical dictionary*: John Wiley & Sons.
- Lide, D. R. (2012). *CRC handbook of chemistry and physics*: CRC Boca Raton.
- Liu, J., Qian, M., Cai, G., Yang, J., & Zhu, Q. (2007). Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain. *Journal of Hazardous Materials*, 143(1-2), 443-447.
- Ma, Y., He, J., Ma, C., Luo, J., Li, H., Liu, T., . . . Lou, Z. B. (2014). Ectomycorrhizas with *P axillius involutus* enhance cadmium uptake and tolerance in *P opulus× canescens*. *Plant, cell & environment*, 37(3), 627-642.
- McCutcheon, S., & Schnoor, J. (2003). Overview of phytotransformation and control of wastes. *Phytoremediation: Transformation control of contaminants*, 358.
- McLaughlin, M. J., Palmer, L., Tiller, K., Beech, T. A., and, & Smart, M. (1994). Increased soil salinity causes elevated cadmium concentrations in field-grown potato tubers. *Journal of Environmental Quality*, 23(5), 1013-1018.
- Mjengera, H., & Mkongo, G. (2003). Appropriate deflouridation technology for use in flourotic areas in Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(20-27), 1097-1104.

- Moolenaar, S., & Beltrami, P. (1998). Heavy metal balances of an Italian soil as affected by sewage sludge and Bordeaux mixture applications. *Journal of Environmental Quality*, 27(4), 828-835.
- Murakami, M., Ae, N., & Ishikawa, S. (2007). Phytoextraction of cadmium by rice (*Oryza sativa* L.), soybean (*Glycine max* (L.) Merr.), and maize (*Zea mays* L.). *Environmental Pollution*, 145(1), 96-103.
- Phantumvanit, & Legeros, R. Z. (1997). Characteristics of bone char related to efficacy of fluoride removal from highly-fluoridated water. 30, 207-218.
- Regmi, P., Moscoso, J. L. G., Kumar, S., Cao, X., Mao, J., & Schafran, G. (2012). Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switchgrass biochar produced via hydrothermal carbonization process. *Journal of environmental management*, 109, 61-69.
- Sessitsch, A., Kuffner, M., Kidd, P., Vangronsveld, J., Wenzel, W. W., Fallmann, K., . . . Biochemistry. (2013). The role of plant-associated bacteria in the mobilization and phytoextraction of trace elements in contaminated soils. 60, 182-194.
- Siebers, N. (2009). *Effect of Phosphate addition on Immobilization and Phytoavailability of Cd in Soil and The Chemical Form and Translocation of Cd within Rice Plants*. (Master's thesis, Interdepartment of Environmental Management, Graduate School, Chulalongkorn University.),
- Smolders, E., & McLaughlin, M. J. (1996). Chloride increases cadmium uptake in Swiss chard in a resin-buffered nutrient solution. *Soil Science Society of America Journal*, 60(5), 1443-1447.
- Sriprachote, A., Pengprecha, S., Pengprecha, P., Kanyawongha, P., Ochiai, K., & Matoh, T. (2014). Assessment of Cadmium and Zinc Contamination in the Soils Around Pha Te Village, Mae Sot District, Tak Province, Thailand. *Applied Environmental Research*, 36(4), 67-79.
- Surabhukdi, P. (2006). *Cadmium and Zinc Removal by Some Cut Flower Plants*. Master's thesis, Interdepartment of Environmental Science, Graduate School, Chulalongkorn University.,
- Tlustos, P., Pavlikova, D., Balik, J., Szakova, J., Hanc, A., & Balikova, M. (1998). The accumulation of arsenic and cadmium in the plants their distribution.
- Waalkes, M. P. (2003). Cadmium carcinogenesis. *Mutation Research*, 533(1-2), 107-120.
- Wang, M., Zou, J., Duan, X., Jiang, W., & Liu, D. (2007). Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.). *Bioresource Technology*, 98(1), 82-88.
- Welch, R., & Norvell, W. (1999). Mechanisms of cadmium uptake, translocation and deposition in plants. In *Cadmium in soils and plants* (pp. 125-150): Springer.
- WHO. (1992). Cadmium: Environmental Aspects. *Environmental Health Criteria*: 135, 156.

Yanai, J., Zhao, F.-J., McGrath, S. P., & Kosaki, T. (2006). Effect of soil characteristics on Cd uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *J Environmental Pollution*, 139(1), 167-175.

กรมควบคุมมลพิษ. (2545). เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการของสารเคมีเฉพาะเรื่อง แคดเมียม (*cadmium*).

กรุงเทพมหานคร

กรมวิชาการเกษตร สถาบันวิจัยข้าว. (2544). ความรู้เรื่องข้าว. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.

กิตติพันธ์ บางยี่ขัน. (2551). โลหะกับการพัฒนาประเทศ. Retrieved from รายงานวิชาการฉบับที่ สอพ.

3/2551. สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่

เกศิณี พุกุลานนท์. (2547). การทำให้โลหะหนักจำนวนมากที่ปนเปื้อนในดินเสถียร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอม

เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เอกสารประกอบการเรียนวิชาสัมมนา สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรศาสตร์. (2548). ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2541). ปฐพีวิทยาเบื้องต้น.

กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2542). พืชเศรษฐกิจ.

กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คมสรุร ศิริติกุล. (2547). การล้างดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เอ. Retrieved from

โครงการพิเศษสาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม

เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร:

จักรพงษ์ แสนชัย. (2548). การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกระดุก กระตุ้นโดยซิงก์

คลอไรด์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

จันจิรา จารุสุภวัฒน์. (2553). ชีวิตคน 3 ตำบล อำเภอแม่สอดกับการแก้ปัญหาแคดเมียม Retrieved from คมชัด

ลึก website: <http://www.komchadluek.net/news/local/46187>

จำรัส โปรงศิริวัฒนา. (2534). ความรู้เรื่องข้าว. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร.

เดชา ฉัตรศิริเวช. (2552). กระบวนการดูดซับ (1 ed.). กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทัศนีย์ อัดตะนันท์. (2543). ดินใช้ปลูกข้าว กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทัศนพรพรรณ ทองดีเลิศ. (2555). โรคอีโตอีโตในพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมของประเทศญี่ปุ่น.

<http://wqm.pcd.go.th/km/images/stories/agriculture/2555/itaitai.pdf>

นงคราญ กาญจนประเสริฐ, พ. ส., สัมฤทธิ์ ภู่งเรือง และบุญแสน เตียนบุญธรรม. (2546). คู่มือผู้เรียนวิชา

ปฐพีวิทยา. นครสวรรค์: สถาบันราชภัฏนครสวรรค์.

นิตยาพร ต้นมณี และ จุไร ทองมาก. (2537). การปนเปื้อนของธาตุแคดเมียมในดินในพื้นที่บางแห่งของประเทศไทย.

Retrieved from กรุงเทพฯ:

- บุญตา อี๊บ และ วันชัย วงษ์วิไล. (2546). ความสามารถของการสะสมโครเมียมของหญ้าแฝกหอมและหญ้าแฝก
ดอน โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
บุปผา แซ่มประเสริฐ. (2527). ผลกระทบของแคดเมียมในแอคติเวเตดสลัดจ์ที่มีต่อพืชผักและธาตุอาหาร
บางชนิด. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
ประยูรท์ สมบูรณ์. (2542). การแพร่กระจายแคดเมียมและสังกะสีในดินจากกิจกรรมเหมืองแร่สังกะสี: กรณีศึกษา
เหมืองสังกะสี อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยี
การวางแผนสิ่งแวดล้อมเพื่อพัฒนาชนบท), มหาวิทยาลัยมหิดล,
ปรีดา พากเพียร, อ. เอ., ไฮน์ เอ็กการ์ด และ ธวัชชัย ณ นคร. (2541). โลหะหนัก แหล่งที่มาค่ามาตรฐานและการทำ
ปฏิกิริยากับดิน. วารสารดินและปุ๋ย, 20(2), 41-49.
พิชิต พงษ์สกุล และ สุรสิทธิ์ อรรถจารุสิทธิ์. (2542). การประเมินความปนเปื้อนของธาตุโลหะหนักในดิน วารสารดิน
และปุ๋ย, 21(2), 71-82.
ภาราดา มณีวงศ์. (2548). การกระจายตัวของแคดเมียมในตะกอนท้องน้ำและตะกอนแขวนลอย บริเวณลุ่มแม่น้ำ
ดาว และลุ่มน้ำแม่กุ ในอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
มณฑล คงปิ่น. (2542). การขจัดฟลูออไรด์ออกจากน้ำบริโภค รายงานการวิจัยศูนย์ทันตสาธารณสุข
ระหว่างประเทศ: กรมอนามัย เชียงใหม่
มลิวรรณ บุญเสนอ. (2548). พืชกับการฟื้นฟูคุณภาพดิน. วารสารสิ่งแวดล้อม, 9(4), 19.
ยุพดี เสดพรธ. (2544). ชีวิตกับสิ่งแวดล้อม: คณะมนุษยศาสตร์และสังคม สถาบันราชภัฏเพชรบุรี วิทยาลัย
ในพระบรมราชูปถัมภ์ ปทุมธานี.
วรรณภา ไชยสีตะมณฑล. (2538). การเพิ่มความแข็งแรงของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เตรียมจากกระดูกวัว ควายโดยการ
เหนียวทำให้เกิดแรงอัดที่ผิวหน้า. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร ภาควิชาวัสดุศาสตร์), จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย,
วิไลภรณ์ บุญญกิจจินดา. (2523). อิทธิพลของธาตุโลหะบางอย่างที่มีต่อการเจริญเติบโตของพืชผักบางชนิด.
(วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
ศิริลักษณ์ กล้าการชาย และธัญชัย กองแก้ว. (2548). การบำบัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้หญ้าแฝก
(Online). http://www.scisoc.or.th/stt/31/sec_h/papers/stt31_H0020.pdf (27
พฤศจิกายน 2556)
ศุภกิจ พัฒนเดชะ. (2545). การไหลผ่านกระดูกกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย. (วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. (2538). ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. (2540). ภาวะมลพิษของดิน. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. (2545). ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี (พิมพ์ครั้งที่ 3 ed.). กรุงเทพมหานคร:
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. (2559). มลพิษทางดิน (1 ed.). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพานอันเนื่องมาจากพระราชดำริจังหวัดสกลนคร. (2555). การปลูกข้าวพันธุ์ขาวหอมมะลิ 105. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ.
- สรตนา เสนาะ. (2548). การติดตั้งธาตุโลหะหนักของหญ้าแฝก ทานตะวัน และข้าว ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรศาสตร์), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
- สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2547). ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน. กรุงเทพมหานคร
- สุชาดา สุทธิพิบูลย์. (2547). ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและอาร์เซนิกในน้ำเสียด้วยถ่านกระดุก. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.,
- สุดารัตน์ เลิศวิทยาพนธ์. (2551). การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมด้วยสารดูดซับจากกระดุกหมู. (วิทยานิพนธ์ปริญญา ดุษฎีบัณฑิต), สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- สุธิลา ตูลยะเสถียร, โกศล วงศ์สุวรรณ, & และสลิต วงศ์สุวรรณ. (2544). มลพิษสิ่งแวดล้อม (1 ed.). กรุงเทพมหานคร: บริษัทรวมสาส์น.
- สุรณี โรจนอารยานนท์. (2532). สภาวะแวดล้อมของเรา. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อนงนาฏ ศรีประโชติ. (2549). การกระจายตัวของแคดเมียมในดินที่มีการปนเปื้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อรธณพ หอมจันทร์. (2544). เอกสารประกอบการสอนวิชาพิษวิทยาสิ่งแวดล้อม. Retrieved from
- อลิสา วังไฉ. (2553). การบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ. 243-254.
- อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ. (2544). การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกระดุกสัตว์. (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต), ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ศศิธร เพชรแสน
วัน เดือน ปี เกิด	25 มิถุนายน 2523
สถานที่เกิด	หนองคาย
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สถาบันราชภัฏอุดรธานี วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	786/1 หมู่ 2 ซอยไร่ยาสูบ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.หนองคาย 43000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY