การดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน

นางสาววราภรณ์ ศรีตัมภวา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CADMIUM UPTAKE BY SUGARCANE GROWN IN CONTAMINATED SOIL

Miss Waraporn Sritumpawa

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน
โดย	นางสาววราภรณ์ ศรีตัมภวา
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ม.ร.ว. กัลยา ติงศภัทิย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ปารมี เพ็งปรีชา)

..... กรรมการ
(ดร. จันทรา ทองคำเภา)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วราภรณ์ ศรีตัมภวา : การดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน. (CADMIUM UPTAKE BY SUGARCANE GROWN IN CONTAMINATED SOIL) อ. ที่ปรึกษา : ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 189 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน และศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย 5 ส่วน คือ ราก ท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย น้ำอ้อย และใบ ทำการศึกษาที่ระยะเวลา 3, 6 และ 9 เดือน โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาในพื้นที่จริงที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน โดยปริมาณแคดเมียมในดินมีค่าเท่ากับ 2.57±6.04, 16.66±4.99 และ 174.51±42.80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในเรือนทดลองที่ใส่สารประกอบ $Cd(NO_3)_2.4H_2O$ ลงในดินที่ระดับควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่าความสามารถของการดูดดึงแคดเมียมทั้งหมดในดินที่ปนเปื้อนจากพื้นที่จริง มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาในเรือนทดลอง

ในการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมทุกส่วนของอ้อย พบว่า อ้อยที่ปลูกในพื้นที่จริงมีปริมาณการสะสมแคดเมียมสูงสุดที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน โดยมีค่าเท่ากับ 4.33, 4.86 และ 6.49 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เช่นเดียวกับในเรือนทดลองที่มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในทุกส่วนของอ้อยเท่ากับ 8.66, 15.65, 17.47 และ 28.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และพบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย 5 ส่วนในพื้นที่จริงที่ระดับความเข้มข้น >20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า รากอ้อยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 28.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 เดือน ตามด้วยท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย ใบ และน้ำอ้อย โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมเท่ากับ 5.38, 5.03, 3.87 และ 0.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาในเรือนทดลองที่ระดับความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบการสะสมแคดเมียมเท่ากับ 96.57, 29.68, 9.38, 3.99 และ 1.19 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 เดือน นอกจากนี้ ประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมจากดินด้วยอ้อยที่ปลูกในพื้นที่จริง และในเรือนทดลอง ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P<0.05$) โดยอ้อยที่ปลูกในพื้นที่จริงมีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมมีค่าเท่ากับ 0.55 เปอร์เซ็นต์ และในเรือนทดลองมีประสิทธิภาพในการดูดดึงมากที่สุดเท่ากับ 1.58 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน ในระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 3-20 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต วราภรณ์ ศรีตัมภวา

ปีการศึกษา 2550 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

4989174220 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD: CADMIUM / SUGARCANE / UPTAKE / ACCUMULATION / CONTAMINATED SOIL / CLEAN-UP SITE

WARAPORN SRITUMPAWA : CADMUIM UPTAKE BY SUGARCANE GROWN IN CONTAMINATED SOIL. THESIS ADVISOR: PANTAWAT SAMPANPANISH, Ph.D., 189 pp.

This research was conducted to investigate the capacity of sugarcane to uptake cadmium from contaminated soil and to accumulate it in five plant parts: roots, underground stems, bagasses, juice and leaves. The research compared sugarcane grown in cadmium contaminated sites with plants in experimental pots. The onsite study was conducted in fields with three different level of cadmium contaminated soil: <3, 3-20 and >20 mg Cd kg^{-1}soil or 2.57±6.04, 16.66±4.99 and 174.51±42.80 mg kg^{-1}, respectively. For the pot experiment, soils were contaminated with cadmium nitrate solution at different rates: control, 10, 20 and 40 mg Cd kg^{-1}. A Seedling stem was then planted in the cadmium contaminated soil. Soil and sugarcane samples for both onsite and pot experiment were harvested at 3, 6 and 9 months. The results showed that cadmium accumulation capacities in onsite and pot plants tended to decrease with increasing growth time.

The accumulation of cadmium in onsite sugarcane at 9 months was 4.33, 4.86 and 6.49 mg kg^{-1} in <3, 3-20 and >20 mg kg^{-1} contamination level, respectively. Sugarcane grown in the pot experiment accumulated cadmium of 8.66, 15.65, 17.47 and 28.94 mg kg^{-1} in treatment of control, 10, 20, and 40 mg kg^{-1}, respectively. The results indicated that at the level of >20 mg kg^{-1} onsite soil, cadmium accumulation in various parts of sugarcane at 6 months was highest in root which equaled 28.35 mg kg^{-1} followed by 5.38, 5.03, 3.87 and 0.08 mg kg^{-1} in underground stems, bagasses, leaves and juice, respectively. For the pot experiment, the highest accumulation of cadmium in sugarcane was found at 40 mg kg^{-1} treatment at 6 months. The roots accumulated cadmium equal to 96.57 mg kg^{-1} followed by underground stem, bagasses, leaves and juice which equaled 29.68, 9.38, 3.99 and 1.19 mg kg^{-1}, respectively. However, the results also indicated that the capacity of sugarcane to uptake and accumulate cadmium at the usual harvesting time of 9 months, in both onsite and pot samples was significantly different ($P<0.05$). Consequently, the highest accumulation efficiency of sugarcane was 0.55 percent, onsite study and 1.58 percent, on pot experiment, at harvesting time of 9 months in 3-20 and 10 mg kg^{-1} soil treatments, respectively.

Field of study Environmental Science Student's signature Waraporn Sritumpawa

Academic year 2007 Advisor's signature Pantawat Sampanpanish

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ดีด้วยความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจาก ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ท่านได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ของงานด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้ช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ดียิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบ ดร. ปารมี เพ็งปรีชา และ ดร. จันทรา ทองคำเภา ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนบางส่วนในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ปฏิบัติการในการทำงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงพี่ๆ นักวิทยาศาสตร์ทุกคนที่ได้ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ นางสาวสุวีชีรา เรืองขำ นางสาววิไลวรรณ์ แฉ่งเจริญ นายมงคลชัย อัศวดิษฐเลิศ นายวิชญ บุญวานิช นายจิรเดช ปันหล้า ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการออกภาคสนาม นางสาววรรณณี แสนทวีสุข นางสาวสุธินี วดีศิริศักดิ์ นายไตรรัตน์ ภิญโญพิทักษ์ นางอรทัย สาระวิน ที่เป็นกำลังใจที่ดีตลอดมาระหว่างทำการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ (พ.ท. ประยูร ศรีตัมภวา) คุณแม่ (นางสมยา ศรีตัมภวา) พี่ชาย (นายสัตวแพทย์ วัชรพงษ์ ศรีตัมภวา) น้องชาย (ว่าที่ ร.ท. พิศาล ศรีตัมภวา) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนการศึกษาในครั้งนี้ รวมถึงให้ความรัก ความห่วงใย และเป็นกำลังใจที่สำคัญให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญภาพ ..... ฐ
คำย่อ ..... ด

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3
1.3 สมมุติฐาน 3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6
2.1 แคดเมียม 6
2.2 อ้อย 20
2.3 การดูดดึงโลหะหนักของพืช 33
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 42
3 วิธีดำเนินการวิจัย 45
3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี 45
3.2 สถานที่ดำเนินการวิจัย 47
3.3 ระยะเวลาการวิจัย 49
3.4 การดำเนินการวิจัย 50
3.5 การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม 57
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ 59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ หน้า

4 ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย 60
4.1 คุณสมบัติและองค์ประกอบเบื้องต้นของดิน 60
4.2 การดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในพื้นที่จริง ของอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก 62
4.3 การดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในเรือนทดลอง ของอำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี 82
4.4 ความสามารถของการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อย ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน จากพื้นที่จริงกับเรือนทดลอง 101
4.5 ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อย ที่ปลูกจากพื้นที่จริงและเรือนทดลอง 111
4.6 สมดุลมวล (Mass Balance) ของการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อย ที่ปลูกในเรือนทดลอง 115
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ 117
5.1 สรุปผลการวิจัย 117
5.2 ข้อเสนอแนะ 120
รายการอ้างอิง 121

ภาคผนวก 131
ภาคผนวก ก 132
ภาคผนวก ข 134
ภาคผนวก ค 135
ภาคผนวก ง 148
ภาคผนวก จ 187
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 189

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

2.1 ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่พบในสิ่งมีชีวิต 8
2.2 ปริมาณสูงสุดของโลหะหนักที่ร่างกายรับได้ (Tolerable Limits) 11
2.3 มาตรฐานโลหะหนักของคุณภาพดิน (Soil Guideline Value) เพื่อทำการเพาะปลูก 18
2.4 ปริมาณโลหะหนักที่ยอมให้มีได้ (Maximum Residue Level; MRL) ในอาหาร 19
2.5 ชนิดพืชที่สามารถเจริญเติบโตในดินที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างแตกต่างกัน 36
2.6 ระดับ CEC ของดิน 38
2.7 ปริมาณแคดเมียมในพืชชนิดต่างๆ ที่ปลูกในดินชนิดเดียวกัน 41
3.1 พื้นที่ปลูกอ้อยที่ระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมต่างกัน 47
3.2 วันที่เก็บตัวอย่างดินและพืชในการศึกษาพื้นที่จริง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก 49
3.3 วันที่ทำการทดลอง และเก็บตัวอย่างในเรือนทดลอง อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี 49
3.4 ค่าพิกัดตำแหน่งของจุดเก็บตัวอย่างในพื้นที่ 51
3.5 พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์ดินที่นำมาศึกษา 52
3.6 ปริมาณสารประกอบแคดเมียมไนเตรท ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) ที่ใส่ลงไปในดิน 55
3.7 เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการย่อยดินด้วยระบบไมโครเวฟ 57
3.8 เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการย่อยส่วนต่างๆ ของอ้อยด้วยระบบไมโครเวฟ 58
4.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของดินเบื้องต้น 61
4.2 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินจากพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 65
4.3 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดินในพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 67
4.4 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) จากดินในพื้นที่จริง 68
4.5 การประเมินระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินในไร่อ้อย 69

ตาราง หน้า

4.6 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยต่อกิโลกรัมจากพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 71
4.7 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกส่วนจากพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 72
4.8 ค่าสูงสุดของโลหะหนักที่ยอมรับได้ให้มีอยู่ในดิน และค่าวิกฤติในพืชที่ยับยั้งการเจริญเติบโต 73
4.9 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในรากอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 75
4.10 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมของอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 77
4.11 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในซานอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 79
4.12 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยของพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 80
4.13 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 82
4.14 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินจากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 84
4.15 เปอร์เซ็นต์การลดลงของปริมาณแคดเมียมในดินจากเรือนทดลอง 85
4.16 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้จากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 87
4.17 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) จากดินในเรือนทดลอง 88
4.18 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยต่อกิโลกรัมจากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 90
4.19 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกส่วนจากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 91
4.20 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในรากอ้อยจากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 93

ตาราง หน้า

4.21 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมจากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 95
4.22 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อยจากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 97
4.23 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยจากเรือนทดลอง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 98
4.24 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยจากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 99
4.25 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยของเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 101
4.26 ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 113
4.27 สมดุลมวลของการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยในเรือนทดลอง 116

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางผนวก หน้า

ค1 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินที่ปลูกอ้อยจากพื้นที่จริง 135
ค2 ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้ในดินที่ปลูกอ้อยจากพื้นที่จริง 135
ค3 ปริมาณแคดเมียมในอ้อยทุกส่วนที่ปลูกจากพื้นที่จริง 136
ค4 ปริมาณแคดเมียมในส่วนรากอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริง 136
ค5 ปริมาณแคดเมียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิมที่ปลูกจากพื้นที่จริง 137
ค6 ปริมาณแคดเมียมในส่วนชานอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริง 137
ค7 ปริมาณแคดเมียมในส่วนน้ำอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริง 138
ค8 ปริมาณแคดเมียมในส่วนใบอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริง 138
ค9 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินที่ปลูกอ้อยจากเรือนทดลอง 139
ค10 ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้ในดินที่ปลูกอ้อยจากเรือนทดลอง 140
ค11 ปริมาณแคดเมียมในอ้อยทุกส่วนที่ปลูกจากเรือนทดลอง 141
ค12 ปริมาณแคดเมียมในส่วนรากอ้อยที่ปลูกจากเรือนทดลอง 142
ค13 ปริมาณแคดเมียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิมที่ปลูกจากเรือนทดลอง 143
ค14 ปริมาณแคดเมียมในส่วนชานอ้อยที่ปลูกจากเรือนทดลอง 144
ค15 ปริมาณแคดเมียมในส่วนน้ำอ้อยที่ปลูกจากเรือนทดลอง 145
ค16 ปริมาณแคดเมียมในส่วนใบอ้อยที่ปลูกจากเรือนทดลอง 146
ค17 ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริง 147
ค18 ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อยที่ปลูกจากเรือนทดลอง 147

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

1.1 แผนผังขอบเขตการวิจัย 4
2.1 แหล่งที่มนุษย์ได้รับแคดเมียม 10
2.2 แนวโน้มการใช้ประโยชน์ของแคดเมียมในประเภทต่างๆ ระหว่างปี 2000 ถึง 2005 15
2.3 พื้นที่ที่มีการปลูกอ้อยในโลก 20
2.4 ลักษณะของลำต้นของอ้อย 22
2.5 ลักษณะปุ่มรากที่ใช้ขยายพันธุ์ของอ้อย 23
2.6 ลักษณะของใบอ้อย 24
2.7 ลักษณะของราก 26
2.8 ระยะการเจริญเติบโตของอ้อย 28
2.9 กลไกการดูดดึงแคดเมียมในรูปเกลือคลอไรด์จากดินของพืช 34
2.10 ปฏิกิริยาของแคลเซียมคาร์บอเนตกับอนุภาคของดินเหนียว 37
2.11 ความสามารถของเนื้อดินในการดูดยึดโลหะ 39
3.1 แผนที่ และตำแหน่งของจุดเก็บตัวอย่างดิน และอ้อยในพื้นที่จริง ของอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก 48
3.2 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 50
3.3 การวางแผนทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) 54
4.1 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินจากพื้นที่จริง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 64
4.2 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดินในพื้นที่จริง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 66
4.3 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกส่วนจากพื้นที่จริง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 71
4.4 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในรากอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 74
4.5 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมของอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 76

ภาพประกอบ หน้า

4.6 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 78
4.7 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 81
4.8 ปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในดินจากเรือนทดลอง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 83
4.9 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้จากเรือนทดลอง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 86
4.10 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของอะลูมินัมไอออนกับน้ำ 89
4.11 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกส่วนจากเรือนทดลอง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 90
4.12 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในรากอ้อยจากเรือนทดลอง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 92
4.13 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมจากเรือนทดลอง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 94
4.14 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อยจากเรือนทดลอง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 96
4.15 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยจากเรือนทดลอง ตามระยะของการเก็บตัวอย่าง 100
4.16 ความสามารถของการดูดดึงแคดเมียมทั้งหมดในดินที่ปนเปื้อน จากพื้นที่จริงกับเรือนทดลอง 103
4.17 ความสามารถของการดูดดึงแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ ที่ปนเปื้อนจากพื้นที่จริงกับเรือนทดลอง 104
4.18 ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมในดินที่ปนเปื้อนโดยอ้อยต่อกิโลกรัม จากพื้นที่จริงกับเรือนทดลอง 105
4.19 ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมในดินที่ปนเปื้อนโดยอ้อยต่อต้น จากพื้นที่จริงกับเรือนทดลอง 106
4.20 ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย จากพื้นที่จริงกับเรือนทดลอง ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 107

ภาพประกอบ หน้า

4.21 ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อย
ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 112

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพประกอบผนวก หน้า

จ1 การดำเนินงานวิจัยในพื้นที่จริงของอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก 187
จ2 การดำเนินงานวิจัยในเรือนทดลองของอำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี 188

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำย่อ

AAS	Atomic Absorption Spectrometer
ANOVA	Analysis of Variance
CEC	Cation Exchange Capacity; ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก
c $mol_{(+)}$ kg^{-1}	Centimoles of Positive Charge per Kilogram
Codex	Codex or Codex Alimentarius; มาตรฐานอาหารสากล หรือมาตรฐานอาหารระหว่างประเทศ
DMRT	Duncan's New Multiple Range Test
DTPA	Diethylene Triaminepentaacetic Acid
EDTA	Ethylene Diaminetetraacetic Acid
GIS	Geographic Information System; ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์
GPS	Global Positioning System; ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก
GF/C	Glass Micro Filters
ICA	International Cadmium Association
IWMI	International Water Management Institute; สถาบันบริหารจัดการน้ำระหว่างประเทศ
LK 92-11	พันธุ์อ้อยลูกผสม เกิดจากพันธุ์ เค 84-200 (แม่) ผสมกับพันธุ์อีเหี่ยวแดง (พ่อ)
me/ 100 g	milli-equivalent per 100 grams
mg kg^{-1}	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
MRL	Maximum Residue Level; ปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด
NRC-EHWM	National Research Center for Environmental and Hazardous Waste Management; ศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย
ppb	part per billion; ส่วนในพันล้านส่วน
ppm	part per million; ส่วนในล้านส่วน
RCBD	Randomized Complete Block Design; การวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล๊อคสมบูรณ์
USEPA	United States Environmental Protection Agency; องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา
WHO	World Health Organization; องค์การอนามัยโลก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นทุกแหล่งกำเนิดของประเทศอยู่ในภาวะวิกฤต ที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะการปนเปื้อนของเสียอันตรายหรือโลหะหนักในดินและแหล่งน้ำ เป็นต้น ซึ่งปัญหาดังกล่าวมักเกิดจากการทำกิจกรรมต่างๆ อาทิ กิจกรรมการทำเหมือง และกิจกรรมทางการเกษตรที่มีการเปิดหน้าดินเพื่อการเพาะปลูก ทำให้โลหะหนักมีการแพร่กระจายลงสู่น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และถูกสะสมในดิน รวมถึงสภาพธรรมชาติทางธรณีวิทยาก็เป็นสาเหตุที่สำคัญของการปนเปื้อนโลหะหนัก โดยเกิดจากกระบวนการผุพังสลายตัวตามธรรมชาติของพื้นที่

นักวิจัยจากสถาบันบริหารจัดการน้ำระหว่างประเทศ (International Water Management Institute; IWMI) ร่วมกับกรมวิชาการเกษตร ได้ทำการศึกษาระดับสารแคดเมียมในบริเวณพื้นที่ห้วยแม่ตาว ตำบลพระธาตุผาแดง และตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ระหว่างปี 2541-2546 ซึ่งผลจากการสำรวจ พบปริมาณแคดเมียมปนเปื้อนในดินนาข้าว และเมล็ดข้าวในระดับสูงที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน โดยปริมาณการปนเปื้อนของแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในดินบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาวตอนล่าง มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาวตอนบนและพื้นที่ข้างเคียง และมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าค่ามาตรฐาน (ประยุทธ สมบูรณ์, 2542) จากผลการศึกษาในช่วงแรก (ปี 2541-2543) พบว่า มีปริมาณแคดเมียมในดินจำนวน 3.4-284 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานของกลุ่มประชาคมยุโรป (European Community, EC) ที่กำหนดไว้ 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน (คนึงนิจ นิชานนท์ และ ฉันทนา ผดุงทศ, 2548) ซึ่งค่าแคดเมียมที่ตรวจพบเกินกว่ามาตรฐานถึง 1.13-94 เท่า นอกจากนี้พบว่า มีแคดเมียมในเมล็ดข้าว 0.1-44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมข้าว ซึ่งถือว่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Codex, 2005) ซึ่งเป็นอันตรายกับประชาชนที่บริโภคข้าวที่ปลูกในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวิจัยสาเหตุของการปนเปื้อนแคดเมียมในดินพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ได้มีการเสนอมาตรการป้องกัน และแก้ไข ซึ่งหนึ่งในมาตรการนั้นคือการปลูกพืชที่ไม่ใช้เป็นอาหาร (Cultivation of Non-food Crop) ได้แก่ ไม้ยืนต้นโตเร็ว หรือ ไม้ดอกไม้ประดับ ที่ให้ผลทางเศรษฐกิจไม่น้อยกว่าการปลูกข้าว เช่น ยูคาลิปตัส ดาวเรือง เป็นต้น อัน

เป็นมาตรการที่สามารถนำไปใช้ในการแก้ไขปัญหาพื้นที่ที่ปนเปื้อนแคดเมียมได้ (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2549)

จากภาวะปัญหาการขาดแคลนพลังงานเชื้อเพลิงของประเทศที่เกิดขึ้นอยู่ในปัจจุบัน จึงได้มีการนำอ้อยมาศึกษา เพื่อใช้ประโยชน์จากอ้อยนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นเอทานอล อันเป็นการใช้พลังงานทดแทนจากพืช และเป็นตัวช่วยดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในพื้นที่จริงออกจากดิน ด้วยคุณสมบัติของอ้อยที่เป็นพืชที่ง่ายต่อการปลูกและการดูแลรักษา มีความทนทานต่อสภาพภูมิประเทศ และสามารถขยายพันธุ์ได้ดี อีกทั้งเป็นพืชเศรษฐกิจที่ให้ผลตอบแทนเชิงพาณิชย์สูง จึงเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้

การศึกษาการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยในเรือนทดลอง อาจใช้เป็นตัวแทนในการประมาณค่าของการดูดดึงแคดเมียมในพื้นที่จริงได้ เนื่องจากสารประกอบแคดเมียมที่เติมลงไปทราบความเข้มข้นแน่นอน และอยู่ในรูปที่พืชดูดดึงไปใช้ได้ (Available Form) ซึ่งมีความแตกต่างกันจากดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่จริง ที่มีรูปแบบของแคดเมียมแตกต่างกันไปตามสภาพของแต่ละพื้นที่ จากการสำรวจ ตรวจวิเคราะห์คุณภาพดิน ตามความลึกของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, สำนักบริหารและฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม (2547: 2) ที่ตำบลพระธาตุผาแดง ตำบลแม่ตาว และตำบลแม่กุ อำเภอแม่สอด ได้รายงานว่า ส่วนใหญ่มีการพบแคดเมียมปนเปื้อนในบริเวณนี้ตั้งแต่ระดับผิวดินจนถึงความลึกประมาณ 0.6-2 เมตร ด้วยความเข้มข้น 49-430 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเกิดจากหลายสาเหตุทับถมกันทำให้มีแคดเมียมอยู่ในหลายรูปแบบ ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จึงต้องการทราบถึงความสอดคล้องของความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมในอ้อย และการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย ที่อยู่ในพื้นที่จริงกับในเรือนทดลองที่มีการควบคุมระดับความเข้มข้น เพื่อนำไปช่วยฟื้นฟูพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมจริงได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถของการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อย ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนจากพื้นที่จริง กับในดินที่มีระดับแคดเมียมต่างกันจากเรือนทดลอง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย 5 ส่วน คือ ราก ท่อน พันธุ์เดิม ชานอ้อย น้ำอ้อย และใบ ระหว่างดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่จริงกับดินทดลองที่มีการใส่สารประกอบแคดเมียม

1.3 สมมุติฐาน

1.3.1 ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมจากดินของอ้อย มีความแตกต่างกันตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน และตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง

1.3.2 ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนจริง มีความสอดคล้องกับการดูดดึงแคดเมียมที่ปลูกในเรือนทดลอง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การทำวิจัยนี้ เป็นการศึกษาถึงความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมจากดิน ที่มีการปนเปื้อนของอ้อยโดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ในพื้นที่จริง และเรือนทดลอง และศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย ซึ่งขอบเขตของการวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 1.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.4.1 ท่อนพันธุ์อ้อยที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ พันธุ์ลูกผสม LK 92-11 จากจังหวัดกำแพงเพชร

1.4.2 แคดเมียมที่ใช้ในการทดลอง คือ สารประกอบแคดเมียมไนเตรท ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$)

1.4.3 ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างตั้งแต่เดือนธันวาคม 2549 ถึง ธันวาคม 2550

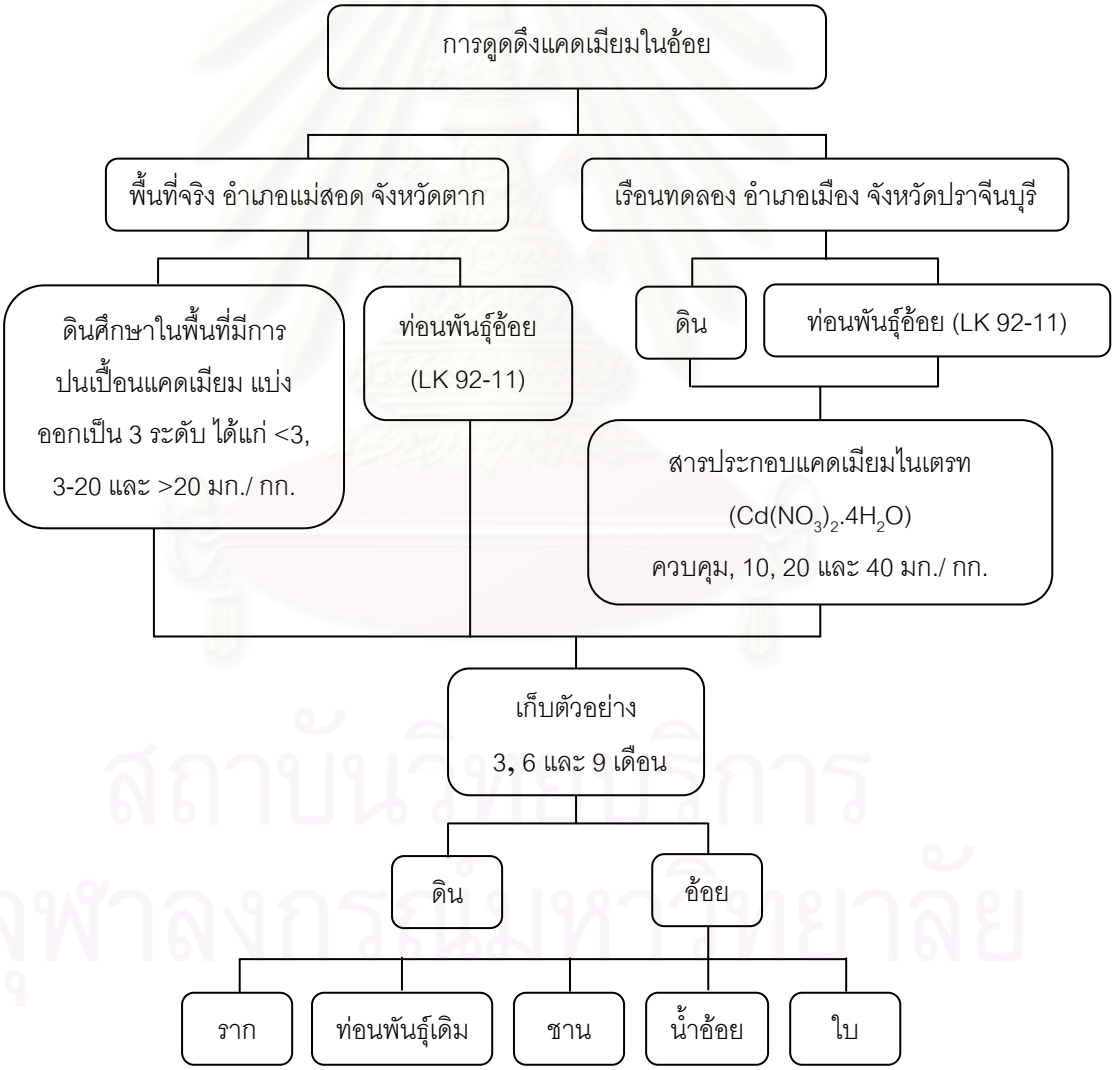
1.4.4 พื้นที่จริงที่ใช้ในการทดลองคือ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยแบ่งตามพื้นที่ที่มีค่าระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมต่างๆ กัน จากระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ของ National Research Center for Environmental and Hazardous Waste Management (NRC-EHWM) (2005) ได้แก่

1) พื้นที่ของหมู่บ้านแม่กุน้อย ตำบลแม่กุ มีระดับของการปนเปื้อนแคดเมียม <3 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน

2) พื้นที่ของหมู่บ้านแม่ตาวแพะ ตำบลแม่ตาว มีระดับของการปนเปื้อนแคดเมียม 3-20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน

3) พื้นที่ของหมู่บ้านแม่ตาวแพะ ตำบลแม่ตาว มีระดับของการปนเปื้อนแคดเมียม >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน

1.4.5 ดินที่ใช้ในเรือนทดลองมาจากพื้นที่เกษตรกรรม อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี



รูปที่ 1.1 แผนผังขอบเขตการวิจัย

1.4.6 การทดลองในเรือนทดลอง มีการวางแผนแบบ 3 x 4 Factorial in Randomized Complete Block Design (RCBD) ซึ่งประกอบด้วย 2 ปัจจัย และทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) จำนวนการเก็บตัวอย่างทั้งหมด 3 ครั้ง ที่ระยะเวลา 3, 6 และ 9 เดือน ทั้งในพื้นที่จริง และในเรือนทดลอง โดยในเรือนทดลองได้เริ่มทำการเก็บตัวอย่างครั้งแรกหลังจากที่ใส่สารประกอบแคดเมียม ทั้งนี้ ตัวอย่างอ้อยได้มีการแยกออกเป็น 5 ส่วนได้แก่ ราก ท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย น้ำอ้อย และใบ

2) ระดับความเข้มข้นของสารประกอบแคดเมียมไนเตรท 4 ระดับ คือ ควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบความสามารถของอ้อยในการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน

1.5.2 สามารถใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาดินปนเปื้อนแคดเมียมในสภาพจริงได้

1.5.3 เป็นวิธีการแก้ไขปัญหาพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนสารพิษโดยการใช้พืชบำบัด อีกทั้งเป็นการส่งเสริมการปลูกอ้อย ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่นำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แคดเมียม

แคดเมียมถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1817 โดย Friedrich Strohmeyer เป็นนักเคมีชาวเยอรมัน ได้ตั้งชื่อในภาษาลาตินว่า cadmia และในภาษากรีกชื่อว่า kadmeia ซึ่งชื่อนี้ได้มาจากคำว่า calamine (Zinc Carbonate) เป็นการแยกออกไซด์ของธาตุนี้ที่อยู่ปะปนในปริมาณเล็กน้อยกับซิงค์คาร์บอเนต ($ZnCO_3$) โดยทำให้ตกตะกอนออกมาด้วยไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แล้วรีดิวซ์ต่อไปเป็นโลหะอิสระ (Steve, 2007) แคดเมียมชอบอยู่กับซัลเฟอร์ (S) มากกว่า สังกะสี (Zn) ในธรรมชาติพบแคดเมียมในรูปของซัลไฟต์ (Greenockite, CdS) ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งจะพบปะปนอยู่กับแร่สังกะสี เป็นผลิตผลพลอยได้จากการถลุงแร่สังกะสี (Kabata-Pendias และ Pendias, 2000: 144)

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของแคดเมียม

แคดเมียม (Cadmium, Cd) เป็นโลหะหนัก ผลึกมีสีขาวฟ้า วาว คล้ายคลึงกับสังกะสี จัดเป็นธาตุหมู่ IIB ในตารางธาตุ (Periodic Table of Elements) เช่นเดียวกับสังกะสี (Zn) และปรอท (Hg) ซึ่งมีอะตอมมิคนัมเบอร์ (Atomic Number) เท่ากับ 48 และมวลอะตอม (Atomic Mass) เท่ากับ 112.411 มีความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) 8.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว (Melting Point) 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด (Boiling Point) 767 องศาเซลเซียส เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเนื้ออ่อน เบา สามารถบิดโค้งงอได้ ถูกตัดได้ง่าย และทนต่อการกัดกร่อน มักอยู่ในรูปแท่ง แผ่น เส้นลวด หรือเป็นผงเม็ดเล็ก ๆ (Traina, 1999: 11)

2.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของแคดเมียม

แคดเมียมเป็นธาตุที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่ละลายได้ดีในกรดไนตริก (Nitric Acid) และละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) และกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid) อย่างช้าๆ (Adriano, 2001) ในอากาศที่มีความชื้นแคดเมียมจะถูกออกซิไดซ์ (Oxidize) อย่างช้าๆ ไปเป็น

แคดเมียมออกไซด์ (Cadmium Oxide; CdO) จากคุณสมบัติที่แคดเมียมสามารถละลายได้ในกรดอ่อน แคดเมียมจึงเป็นอันตรายต่อคนและสิ่งมีชีวิตแบบเฉียบพลันเมื่อเข้าสู่ร่างกาย

2.1.3 **แหล่งที่มาของแคดเมียม**

แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่สามารถพบได้ตามธรรมชาติ ซึ่งมีทั้งประโยชน์หากใช้ในปริมาณที่เหมาะสม และสามารถเป็นโทษได้เช่นกัน หากไม่มีการควบคุมดูแลอย่างถูกต้อง โดยสามารถแบ่งแหล่งที่มาของแคดเมียมได้ดังต่อไปนี้

1) ในธรรมชาติ

ในธรรมชาติแคดเมียมจะมีการกระจายตัวอยู่ในเปลือกโลก ซึ่งมีความเข้มข้นเฉลี่ยประมาณ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (WHO, 1992; Alloway, 1995b) ในชั้นดินบน (Top Soil) ของประเทศออสเตรเลีย ความลึกประมาณ 10 เซนติเมตร พบแคดเมียมอยู่ในช่วง 0.1-0.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือประมาณ 0.1-0.7 กิโลกรัม แคดเมียมต่อเฮกแตร์ กระจายตัวอยู่ชั้นบนที่มีกิจกรรมการเพาะปลูก (Bell, Barry และ McLaughlin, 2001) และมักจะพบอยู่ร่วมกับแร่สังกะสี โดยจะพบในระดับที่สูงกว่าปกติในตะกอนหินประมาณ 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งการผุพัง (Weathering) และการกัดกร่อน (Erosion) ของดิน มีผลทำให้มีการเคลื่อนย้าย (Translocation) ปริมาณแคดเมียม ซึ่งในสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ มีความเข้มข้นของแคดเมียมแตกต่างกันดังสรุปไว้ในตารางที่ 2.1 (World Health Organization; WHO, 1992) อัตราส่วน Zn:Cd ในหินอยู่ในช่วง 27:1 หรือ 7,000:1 เฉลี่ยแล้วมีประมาณ 500:1

ส่วนในบรรยากาศตามชนบท และบริเวณที่ห่างไกลจากอุตสาหกรรมที่มีแคดเมียม ปริมาณฝุ่นของแคดเมียมหรือควันของแคดเมียมออกไซด์ ต้องมีความเข้มข้นของแคดเมียมต่ำกว่า 0.01 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เช่นเดียวกับพื้นที่เกษตรกรรมที่พบในปริมาณเล็กน้อย (Bell และคณะ, 2001) แต่ในแหล่งชุมชน อาจมีความเข้มข้นของแคดเมียมสูงถึง 0.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และบริเวณที่ใกล้กับเหมืองสังกะสีและโรงงานที่ใช้แคดเมียมในกระบวนการผลิตอาจพบปริมาณแคดเมียมสูงถึง 0.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (สุรภี โรจน์อารยานนท์, 2532)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่พบในสิ่งมีชีวิต

สิ่งมีชีวิต	ส่วนของสิ่งมีชีวิต	ความเข้มข้นของแคดเมียม ($mg\ kg^{-1}$ น้ำหนักแห้ง)
สิ่งมีชีวิตในทะเล (Marine Organisms)		
สาหร่าย (Algae)		<1 ถึง 16
หมึก หอย (Molluscs)	ส่วนที่อ่อนนุ่ม	ไม่เกิน 425
	ไต	ไม่เกิน 547
	ตับ	ไม่เกิน 782
	ต่อมสร้างน้ำย่อย	ไม่เกิน 1,163
กุ้ง ปู (Crustaceans)	ทั้งตัว	<0.4 ถึง 6.2
หนอนทะเล (Annelids)	ทั้งตัว	0.1 ถึง 3.6
ปลา (Fish)	ทั้งตัว	ไม่เกิน 5.2
นกทะเล (Birds)	ไต	ไม่เกิน 231
สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Mammals)	ไต	ไม่เกิน 300
สิ่งมีชีวิตในน้ำจืด (Freshwater Organisms)		
พืช (Plants)	ทั้งต้น	0.5 ถึง 1.8
	ราก	ไม่เกิน 6.7
หมึก หอย (Molluscs)	ส่วนที่อ่อนนุ่ม (น้ำหนักเปียก)	0.2 ถึง 1.4
ไส้เดือนดิน (Annelids)	ทั้งตัว (น้ำหนักเปียก)	0.5 ถึง 3.2
ปลา (Fish)	ทั้งตัว (น้ำหนักเปียก)	0.01 ถึง 1.04
สิ่งมีชีวิตบนบก (Terrestrial Organisms)		
พืช (Plants)	ทั้งต้น	ไม่เกิน 27.1
	เมล็ด	ไม่เกิน 257
ไส้เดือนดิน (Annelids)	ทั้งตัว (น้ำหนักเปียก)	3 ถึง 12.6
นก (Birds)	ทั้งตัว (น้ำหนักเปียก)	<0.05 ถึง 0.24
	ไต (น้ำหนักเปียก)	ไม่เกิน 7.4
สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Mammals)	ไต	ไม่เกิน 8.1

ที่มา: WHO, 1992

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ในปุ๋ย

ปุ๋ยฟอสฟอรัสมีระดับแคดเมียมในปริมาณสูงพบในช่วง 7-170 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยเฉพาะบริเวณแหล่งที่มีหินฟอสเฟตที่ใช้ในกระบวนการผลิตปุ๋ย มีปริมาณแคดเมียมอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Kabata-Pendias และ Pendias, 2000: 57) ซึ่ง Bell และคณะ (2001) รายงานว่า ปัจจุบันความเข้มข้นสูงสุดของแคดเมียม ที่ประเทศออสเตรเลียอนุญาตให้มีได้ในปุ๋ยฟอสฟอรัสคือ 300 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส เมื่อมีการจัดเกรดของปุ๋ย พบว่า ซุปเปอร์ฟอสเฟตเชิงเดี่ยว (Single Superphosphate) ที่ใช้ในหญ้าสำหรับเลี้ยงสัตว์มีแคดเมียมสูงกว่า 250 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส ต่างจากปุ๋ยที่มีคุณภาพสูง (Premium Grade) ที่ใช้สำหรับการปลูกพืช จะพบว่ามีแคดเมียมอยู่ในปุ๋ยซุปเปอร์ฟอสเฟตเชิงเดี่ยวน้อยกว่า 100 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมฟอสฟอรัส ส่วนปุ๋ยไนโตรเจนและปุ๋ยโพแทสเซียมมีปริมาณแคดเมียมอยู่ต่ำมาก

3) ในอุตสาหกรรม

แคดเมียมมักไม่พบอยู่ในสภาพบริสุทธิ์ (Pure State) มักจะอยู่รวมกับธาตุอื่นๆ ในธรรมชาติมักพบแร่แคดเมียมอยู่ร่วมกับสินแร่สังกะสี (Zn) เสมอ ดังนั้นในการทำเหมืองสังกะสีจะได้แคดเมียมเป็นผลพลอยได้ (By Product) จากการหลอมแร่ซัลไฟด์ (Sulphide) และสามารถนำแคดเมียมเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมต่อไป (Alloway, 1995b)

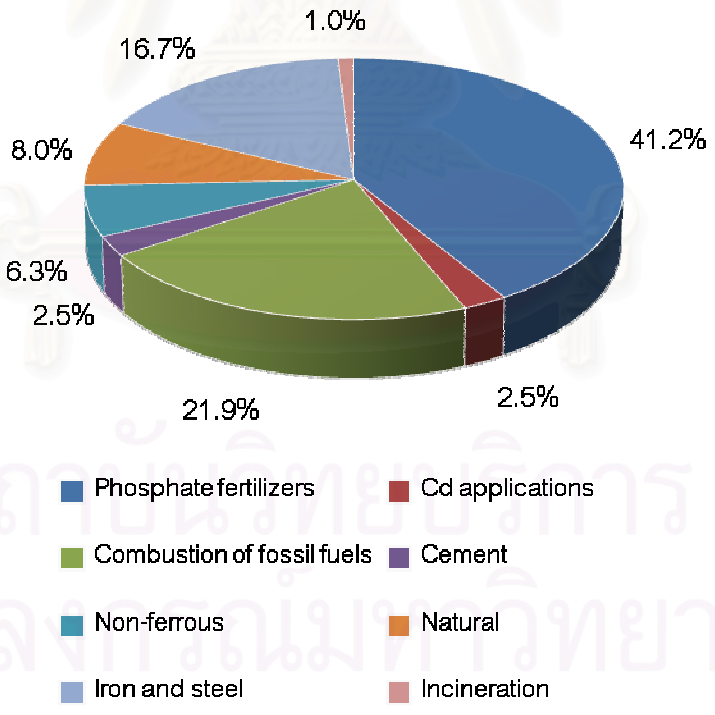
4) ในกากตะกอน

Muttamara และ Leong (1997) ได้กล่าวว่า การใช้กากตะกอนน้ำเสียชุมชน (Domestic Sewage Sludge) หรือกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม ในพื้นที่การเกษตร อาจก่อให้เกิดความเป็นพิษในพืชได้ เนื่องจากโลหะในกากตะกอนสามารถสะสม และปนเปื้อนลงในดินเพื่อการเกษตรที่มีการใช้กากตะกอน และอาจเคลื่อนย้ายเข้าสู่สายใยอาหารไปสู่สัตว์และคนได้ Cottenies, Kiekans และ Van Landschoot (1984) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักจากกากตะกอนในต้นข้าว พบว่า นิกเกิล (Ni) สามารถดูดดึงได้สูงสุด รองมาคือ แคดเมียม และสังกะสี

ถึงแม้ว่ากากตะกอนจะเป็นแหล่งธาตุอาหาร และสามารถช่วยปรับปรุงดิน แต่การเติมกากตะกอนลงสู่ดินมากกว่าหนึ่งครั้งในพื้นที่เดิม เท่ากับเป็นการเพิ่มโลหะหนัก จึงต้องคำนึงถึงปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในกากตะกอนด้วย Gardiner และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาการเติมกากตะกอนซ้ำในพื้นที่เดิมทุกปีเป็นระยะเวลา 5 ปี พบว่า มีการสะสมแคดเมียม (Cd) ในพืชของปีแรกในปริมาณสูง และในปีต่อไปมีการสะสมลดลง

ณัฐพร กะการดี (2543) ได้ทำการศึกษาการทิ้งช่วงเวลาในการเติมกากตะกอนน้ำเสียชุมชนครั้งที่สองของการปลูกผักคะน้า พบว่า การสะสมแคดเมียมในดินชุดดินสระบุรีจะลดลงตามระยะเวลาที่มีการทิ้งช่วงเวลาพักดินที่เพิ่มขึ้น และการสะสมสังกะสีเพิ่มขึ้นตามการทิ้งช่วงเวลาของการพักดินที่มากขึ้น

นอกจากนี้ มนุษย์ได้นำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์ได้จากหลายๆ ประเภท ซึ่งพบว่า มนุษย์จะได้รับแคดเมียมจากการเกษตรที่มีการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสมากกว่าแหล่งอื่นๆ มากกว่า 40% ดังรูปที่ 2.1 (James, 1999)



รูปที่ 2.1 แหล่งที่มนุษย์ได้รับแคดเมียม

ที่มา: http://www.jamesmbrown.co.uk/cd_pigments/cadmium.htm

2.1.4 การเข้าสู่ร่างกายของแคดเมียม

แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่ต้องให้ความสำคัญในสิ่งแวดล้อม เพราะเป็นพิษกับสัตว์และคน แคดเมียมสามารถสะสมในพืชได้ในปริมาณเล็กน้อยโดยไม่เป็นพิษ แต่อาจจะเป็นพิษกับสัตว์ที่กินพืชนั้น ความเป็นพิษของแคดเมียมมีผลต่อมนุษย์มากกว่าสัตว์ เพราะว่ามนุษย์มีชีวิตที่ยาวนาน เมื่อกินอาหารที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม จะทำให้มีการสะสมของแคดเมียมในอวัยวะต่างๆ ได้ (Kirkham, 2006: 19-20; Tudoreanu และ Phillips, 2004)

ในร่างกายมนุษย์แคดเมียมจะมีการสะสมอยู่ที่ไตมากที่สุด และถ้าพบในระดับสูงสามารถทำให้เกิดภาวะไตล้มเหลวได้ (James, 1999) นอกจากนี้ องค์การอนามัยโลกร่วมกับคณะกรรมการผู้เชี่ยวชาญด้านอาหาร (The Joint Expert Committee on Food Additives; JECFA) ได้ร่วมกันพิจารณาปริมาณสูงสุดในการรับประธานอาหารต่อวัน และต่อสัปดาห์สำหรับสารพิษหรือโลหะหนักแต่ละตัวเทียบกับน้ำหนักตัวของผู้ที่ได้รับสารพิษนั้นๆ โดยการกำหนดในลักษณะเช่นนี้ อยู่บนพื้นฐานของการประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหรือการมีอาการ จากการรับสารพิษที่แตกต่างกันของสิ่งมีชีวิต ซึ่งน้ำหนักตัวถือว่าเป็นปัจจัยตัวหนึ่งที่กำหนดความสามารถต่อการทนสภาวะที่สารพิษได้รับเข้าสู่ร่างกาย (Tolerable Limits) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณสูงสุดของโลหะหนักที่ร่างกายรับได้ (Tolerable Limits)

ชนิดโลหะหนัก	ปริมาณสูงสุดที่รับได้ (Tolerable Limits)	
	ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักตัวต่อวัน (µg/kg bodyweight/day)	ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักตัวต่อสัปดาห์ (µg/kg bodyweight/week)
พลวง	0.4	2.8
สารหนู (อนินทรียวัตถุ)	3	21
แคดเมียม	1	7
ทองแดง	200	1,400
ตะกั่ว	3.6	25
ปรอท	0.7	5
เซเลเนียม	12.5	87.5
สังกะสี	1,000	7,000

ที่มา: ศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย, 2550

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุรภี โรจน์อารยานนท์ (2532) รายงานว่า เมื่อแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจะเข้าไปสะสมอยู่ในร่างกายเพิ่มขึ้นตามอายุ ในเด็กที่เกิดใหม่มีแคดเมียมในร่างกาย 1 ไมโครกรัม และคนทั่วไปที่มีอายุ 50 ปีมีแคดเมียมสะสมในร่างกาย 10 มิลลิกรัม ถึง 50-60 มิลลิกรัม ซึ่งแคดเมียมมีการเข้าสู่ร่างกายได้ 2 ทาง คือ

1) การกิน (Ingestion)

มนุษย์จะได้รับแคดเมียมจากอาหาร อากาศ น้ำ และจากใบยาสูบ โดยการกินอาหารที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมในปริมาณเล็กน้อย เช่น ในอาหารทะเล ข้าว พืช ที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม หรือในปุ๋ยฟอสฟอรัส หรือดินเกษตรกรรมที่มีกากตะกอน ซึ่งจะทำให้มีการสะสมแคดเมียมในปริมาณสูง และพืชสามารถดูดซึมแคดเมียมไว้ได้ดีกว่าโลหะอื่นๆ (James, 1999) นอกจากนี้ น้ำผลไม้ก็มีโอกาสได้รับแคดเมียมได้เช่นกัน เนื่องจากแคดเมียมสามารถละลายได้ในกรดที่อยู่ในผลไม้

2) การสูดดม (Inhalation)

การหายใจเอาควัน หรือฝุ่นของแคดเมียมเข้าไปในปอด เช่น การเผาไหม้ของทิ้งที่เป็นพลาสติกและยาง ในโรงงานทำโลหะหรือชุบโลหะ และการทำเหมืองสังกะสีที่พบปริมาณของแคดเมียมมากกว่า 300 มิลลิกรัม ซึ่งเป็นระดับที่อาจทำให้คนตายได้ และหากพบแคดเมียมในปริมาณ 10 มิลลิกรัม จะทำให้สิ่งมีชีวิตมีอาการและแสดงความเป็นพิษจากแคดเมียมให้เห็นอย่างชัดเจน ส่วนในบรรยากาศปริมาณฝุ่นของแคดเมียมหรือควันของแคดเมียมออกไซด์ต้องไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จึงจะปลอดภัยสำหรับสิ่งมีชีวิต

สำหรับผู้สูบบุหรี่ได้รับแคดเมียมจากใบยาสูบในบุหรี่อีกทางหนึ่ง ทำให้ร่างกายมีปริมาณแคดเมียม (Body Burden) สูงเป็น 2 เท่า ของผู้ที่ไม่สูบบุหรี่ ส่วนผู้ประกอบอาชีพในโรงงานอุตสาหกรรมจะได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายทางหายใจ ในรูปของฝุ่นหรือควัน ถ้ามีการปนเปื้อนของแคดเมียมที่มือหรือผู้สูบบุหรี่ในขณะทำงาน แคดเมียมอาจมีโอกาสเข้าทางปากได้ นอกจากนี้ การสูบบุหรี่ 1 มวน จะมีแคดเมียม 1.3 ไมโครกรัมปะปนอยู่ในควันบุหรี่ มีการประมาณการว่าการสูบบุหรี่ 1 ซอง (20 มวน) จะมีแคดเมียมเข้าสู่ปอด 2-4 ไมโครกรัม (สุรภี โรจน์อารยานนท์, 2532)

2.1.5 **ความเป็นพิษของแคดเมียม**

ลักษณะความเป็นพิษจากการสัมผัสแคดเมียม สามารถจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ

1) พิษแบบเฉียบพลัน (Acute Toxicity)

เกิดจากการหายใจเอาไอหรือฝุ่นของแคดเมียมที่มีอยู่ในบรรยากาศ เป็นจำนวนมากเข้าไป อาการที่พบคือ เกิดความระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการไอ เจ็บหน้าอก หายใจสั้น มีกลิ่นโลหะในปาก ไอมีเสมหะเป็นฟองหรือมีเสมหะเป็นเลือด อ่อนเพลีย ปวดขา ต่อมา การถ่ายปัสสาวะจะน้อยลง เริ่มมีไข้ มีอาการของปอดอักเสบ มีเหงื่อออกและสั่น แคดเมียมเมื่อเข้าสู่ร่างกายโดยการกินก็จะเกิดอาการคลื่นไส้ ปวดท้อง อาเจียน ท้องเสีย ปวดศีรษะ ปวดกล้ามเนื้อ มีน้ำลายไหล ช็อก ไตและตับถูกทำลาย มีอาการเหมือนอาหารเป็นพิษ ดังนั้นจึงห้ามใช้แคดเมียมฉาบกระป๋องอาหาร เพราะหากได้รับสารแคดเมียมเข้าไปในจำนวนมากๆ ในระยะเวลาอันสั้นแล้วจะมีความเป็นพิษต่อไตถึงขั้นไตวายได้

2) พิษแบบเรื้อรัง (Chronic Toxicity)

เกิดจากการได้รับแคดเมียมไม่ว่าจะเป็นการหายใจ กินหรือดูดซึมเข้าทางผิวหนังอยู่เป็นประจำ อาการพิษเรื้อรังจากการหายใจ มีอาการไอ สูญเสียการรับกลิ่น น้ำหนักลด โลหิตจาง (Anemia) หายใจลำบาก แคดเมียมส่วนหนึ่งจะไปเคลือบอยู่ตามเหงือกและคอฟัน ทำให้ฟันมีคราบเปื้อนสีเหลืองซึ่งล้างไม่ออก ตับและไตอาจถูกทำลาย เมื่อแคดเมียมเข้าสู่ระบบการไหลเวียนของโลหิตแล้วก็จะไปทำลายปอดทำให้ปอดบวม นอกจากนี้ยังมีอาการเจ็บหัวเข่าและปวดตามกระดูกทั่วร่างกาย มีปัสสาวะสีขาวข้น เนื่องจากไตถูกทำลาย ปริมาณปัสสาวะและเลือดผู้ป่วยเปลี่ยนไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.6 **โทษของแคดเมียม**

แคดเมียมเป็นธาตุที่สามารถไปจับกับโปรตีนเมทอลโลไธโอนีน (Metallothioneins) และไปสะสมอยู่มากที่ตับและไต โดยจะเข้าไปยับยั้งการทำงานของระบบเอนไซม์ ก่อกวนการทำงานของเอนไซม์และโปรตีนที่มีโลหะประกอบ (Metalloprotein) และฟอสโฟไลปิด (Phospholipid) เข้า

ไปแทนที่ (Binding Site) สังกะสีและทองแดง ซึ่งเป็นธาตุที่ร่างกายต้องการ เป็นผลให้เอนไซม์ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ ทำให้อวัยวะต่างๆ ในร่างกายได้รับแคดเมียม (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545; WHO, 1992)

ในปี 2489 ได้พบโรคอิไต-อิไต (Itai-Itai Disease) ที่เมืองโทยามะ (Toyama Prefecture) ประเทศญี่ปุ่น โดยหมอชื่อ Dr. Noboru Hagino อันเกิดมาจากโรงงานผลิตแร่ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี ของบริษัทมิตซุย ที่มีการปล่อยน้ำเสียปะปนกับน้ำธรรมชาติเข้าสู่ไร่นาที่ปลูกข้าวและพืชผักต่างๆ โดยมีรายงานว่า พบปริมาณแคดเมียมที่ผิวดินนาอยู่ในช่วง 1.35-6.88 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็นเวลามากกว่า 30 ปี ทำให้มีแคดเมียมปนเปื้อนอยู่ในเมล็ดข้าว และเป็นเหตุให้แคดเมียมเข้าสู่ร่างกาย ก่อให้เกิดอาการของโรคพิษแคดเมียม โดยอาการเริ่มเป็นที่ไตล้มเหลว ปวดกระดูกตามน่อง ซี่โครง และสันหลัง จนถึงกระดูกผิดรูป โดยพบมากที่สุดในหญิงที่มีบุตรแล้ว (สุรภี โรจน์อารยานนท์, 2532; ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545; Bradl, 2005: 102)

นอกจากนี้ แคดเมียมยังทำให้กระดูกผุ มีอาการเจ็บปวดมาก โลหิตจาง ความดันโลหิตสูง ทำให้เส้นเลือดฝอยตีบ เป็นสารก่อมะเร็งที่ไตและต่อมลูกหมาก เป็นโรคถุงลมโป่งพอง มีผลกระทบต่อภูมิคุ้มกัน ทำให้ฟันมีคราบสีเหลือง

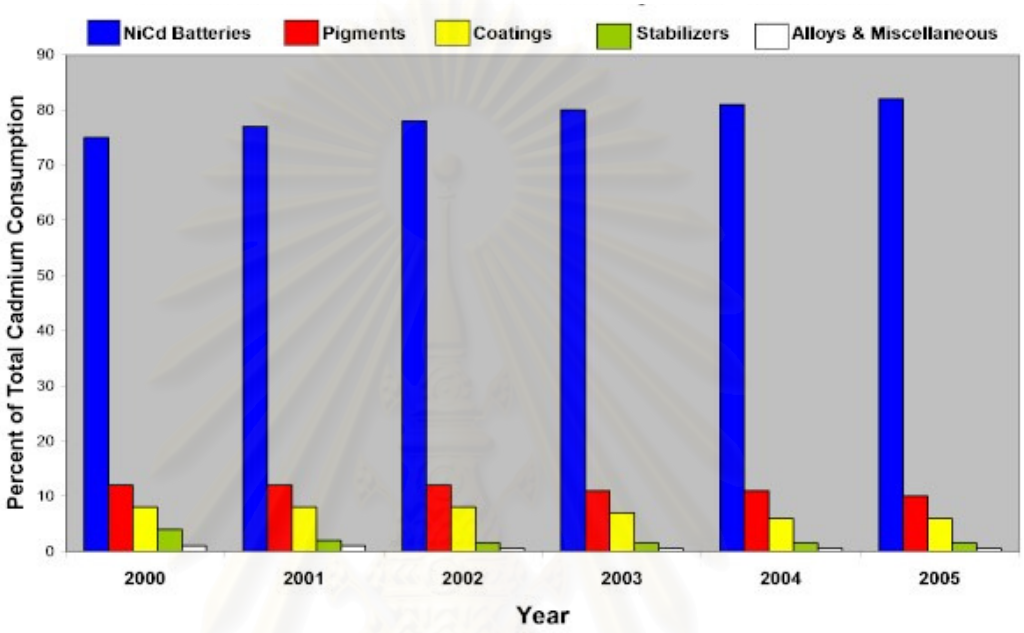
2.1.7 การใช้ประโยชน์ของแคดเมียม

1) ใช้ในอุตสาหกรรม โลหะแคดเมียมและสารประกอบแคดเมียมถูกใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยประเทศทางทวีปยุโรป และอเมริกา มีแนวโน้มในการใช้แคดเมียมมากขึ้นจากปี 2000 ถึง 2005 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 (International Cadmium Association (James, 1999; ICA, 2006) เช่น

1.1) อุตสาหกรรมแบตเตอรี่อัลคาไลน์ ใช้ในการทำแบตเตอรี่ร่วมกับโลหะนิกเกิล สามารถประจุไฟใหม่ได้ (Rechargeable Battery) เรียกว่าแบตเตอรี่ Ni-Cd (Ni-Cd Batteries) มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมประเภทนี้มากกว่า 70%

1.2) อุตสาหกรรมการเคลือบผิว (Coatings) เป็นสารเคลือบเงาหรือชุบโลหะด้วยไฟฟ้าที่เรียกว่า Electroplated Coating จะได้ผิวโลหะที่เงางาม และทนต่อการกัดกร่อน ไม่เป็น

สนิม โลหะที่เคลือบด้วยแคดเมียมจะใช้ในอุปกรณ์รถยนต์ต่างๆ ทั้งที่เป็นส่วนของเครื่องยนต์ และส่วนประกอบอื่นๆ รวมไปถึง น็อตและสกรูด้วย จะกันสนิมได้ดี นอกจากนี้ โลหะเคลือบแคดเมียมยังใช้เป็นชิ้นส่วนของเครื่องบิน วิทยุ โทรทัศน์ ตู้เย็น เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แนวโน้มการใช้ประโยชน์ของแคดเมียมในประเภทต่างๆ ระหว่างปี 2000 ถึง 2005
ที่มา: http://www.cadmium.org/

1.3) อุตสาหกรรมสีย้อม (Pigments) สำหรับพลาสติกบางชนิด ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวของพลาสติก โดยใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เช่น แคดเมียมสเตียเรท (Cadmium Stearate) ในรูปของแคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulphide) และแคดเมียมซัลโฟซีลีไนด์ (Cadmium Sulphoselenide) จะทำให้ได้สีเหลืองสด ส้ม จนถึงสีแดงเข้ม ใช้ในเม็ดพลาสติก แก้วเซรามิค การเคลือบแก้วหรือโลหะ สีในภาพวาด เป็นต้น (ICA, 2006)

1.4) อุตสาหกรรมพีวีซี (Polyvinylchloride; PVC) ทำหน้าที่เป็นตัว สเตบิไลเซอร์ (Stabilizers) ทำให้มีความทนทานไม่แตกง่าย

1.5) อุตสาหกรรมอัลลอยด์ (Specialty Alloys) โลหะแคดเมียมเมื่อผสมกับโลหะอื่นจะเป็นโลหะอัลลอยด์ เช่น Cd-Au จะให้สีเขียวแววววาว จึงนิยมใช้ในการผลิตเครื่องประดับ อัญมณีต่างๆ และโลหะเจือ Cd-Ag สามารถต่อต้านการเปลี่ยนเป็นสีดำ จึงนิยมใช้ทำภาชนะ เช่น ขันน้ำ นอกจากนี้เมื่อผสมแคดเมียมกับทองแดง (Cu) สามารถเพิ่มความเหนียวและทนทานต่อการสึกหรอของทองแดงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทนอุณหภูมิสูงได้ และนำไปใช้ผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องทนความร้อน เช่น ทำหม้อน้ำรถยนต์ หรืออุปกรณ์เครื่องเย็บต่างๆ ที่ต้องระบายความร้อนมากๆ ใช้ผสมกับโลหะอื่นๆ เป็นต้น (สุรภี โรจน์อารยานนท์, 2532)

2) ใช้ในร้านทันตกรรม แคดเมียมบางครั้งใช้ผสมกับปรอท (Hg) ซึ่งเป็นส่วนผสมหลักของอะมัลกัม (Amalgam) ที่ใช้สำหรับอุดฟัน เนื่องจากสามารถรับแรงกระแทกในการบดเคี้ยวอาหารได้สูง ทำให้ใช้งานได้ยาวนาน

3) ใช้ในกิจการน้ำมัน แคดเมียมอยู่ในรูปไดเอทิล (Diethyl Cadmium) ใช้ในกระบวนการผลิตเตตร้าเอทิลเลด (Tetraethyl Lead) ซึ่งเป็นตัวป้องกันการชักกระตุก (Antiknock) ในเครื่องยนต์

4) ใช้ในโฟโตอิเล็กทริกเซลล์ (Photoelectric Cells) หรือโฟโตเซลล์ (Photocell) โฟโตอิเล็กทริกเซลล์ เป็นส่วนประกอบสำคัญในเครื่องมือที่ใช้ควบคุมการทำงานแทนมนุษย์หลายชนิด เช่น ในเครื่องวัดแสงสำหรับใช้กับกล้องถ่ายรูป ประตูที่ปิดเปิดได้เองเมื่อมีคนเดินผ่าน เครื่องส่งสัญญาณจับขโมย เป็นต้น จากโฟโตอิเล็กทริกเซลล์ได้มีผู้คิดค้นคว้าสืบต่อกันมาจนสามารถประดิษฐ์โฟโตคอนดักทิฟเซลล์ (Photoconductive Cell) ที่ไม่ใช้หลอดสุญญากาศแต่ใช้สารกึ่งตัวนำที่มีความไวต่อแสงเป็นพิเศษแทน สารกึ่งตัวนำนี้อาจทำขึ้นจากแคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulphide) หรือแคดเมียมเซเลไนด์ (Cadmium Selenide) เมื่อถูกแสง ทั้งสองชนิดนี้สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติในการต้านทานไฟฟ้าได้ถึงพันล้านเท่า จากมืดสนิทเป็นได้รับแสงสว่างจ้า (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2540b)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.8 มาตรฐานของแคดเมียมในดิน

ในการกำหนดค่ามาตรฐานปริมาณโลหะหนักในดิน จะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็นหลัก โดยเรียกว่า Soil Guideline Value (SGV) หรือค่ามาตรฐานคุณภาพดิน ตามประกาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 พ.ศ. 2547 ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน ได้ให้ความหมายของมาตรฐานคุณภาพดินไว้คือ "มาตรฐานการปนเปื้อนของสารอันตรายที่ยอมให้มีได้ในดิน โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายหรือผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนที่รับสัมผัสดินทั้งทางตรงและทางอ้อม" โดยกำหนดปริมาณแคดเมียมและสารประกอบแคดเมียม (Cadmium and Compounds) ในมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมต้องไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และแบ่งตามมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่น ต้องไม่เกิน 810 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2547) ซึ่งการกำหนดค่าปริมาณโลหะหนักในแต่ละประเทศอาจแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ของเกณฑ์ที่กำหนดของแต่ละประเทศ (ตารางที่ 2.3) โดยมาตรฐานคุณภาพดิน หรือ SGV เป็นค่าที่คำนวณจากหลักการด้านความเสี่ยงต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ในการได้รับโลหะหนัก และการป้องกันความเสี่ยงจากการเคลื่อนที่ของสารพิษเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารด้วย

กรมควบคุมมลพิษได้กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค มีแคดเมียมไม่สูงกว่า 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับน้ำสะอาดโดยทั่วไปมีแคดเมียมต่ำกว่า 1 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) แต่น้ำดื่มและน้ำธรรมชาติอาจมีสูงถึง 10 ppb (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2521) และมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทมีแคดเมียมไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร (กระทรวงสาธารณสุข, 2534)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานโลหะหนักของคุณภาพดิน (Soil Guideline Value) เพื่อทำการเพาะปลูก

โลหะหนัก	มาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเพาะปลูก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง)		
	ประเทศไทย	ประเทศอังกฤษ	ประเทศแคนาดา
สารหนู	3.9	20	14
โครเมียม	300	130	67
แคดเมียม	37	1 (pH 6) 2 (pH 7) 3 (pH 8)	1
ปรอท	23	3	0.16
ตะกั่ว	400	450	55
นิกเกิล	1,600	50	43
เซเลเนียม	3,900	35	1.4

ที่มา: ศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย, 2550

2.1.9 **มาตรฐานของแคดเมียมในอาหารและพืช**

การกำหนดค่ามาตรฐานสูงสุดของโลหะหนักที่ยอมให้มีได้ โดยสารพิษชนิดต่างๆ ในพืชที่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ได้กำหนดในรูปของปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีได้ (Maximum Residue Level; MRL) ในอาหารและพืช ได้สรุปรายละเอียดไว้ในตารางที่ 2.4 ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 ปริมาณโลหะหนักที่ยอมให้มีได้ (Maximum Residue Level; MRL) ในอาหาร

ชนิดของโลหะหนัก	ประเภท	ปริมาณที่ยอมให้มีได้(มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
		ประเทศจีน[a]	Codex[b]	สหภาพยุโรป[c]
แคดเมียม	ข้าวสาร	0.20	0.40	0.20
	พืชใบ เซอลารี และเห็ดบริโภคได้	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.
ตะกั่ว	ธัญพืชและเมล็ดถั่ว	0.20	0.20	0.20
	ผลไม้ และเห็ดที่บริโภคได้	0.10	0.10	0.10
	ผักต้น และผักใบ	0.30	0.30	0.30
	น้ำผลไม้	0.05	0.05	0.05
	นมสด	0.05	0.02	0.50
	เนื้อสัตว์	0.20	0.10	0.10
	ปลา	0.50	0.30	0.30
	น้ำแร่ธรรมชาติ	n.a.	0.01	n.a.
สารหนู	ข้าว	0.15	n.a.	n.a.
	พืชเมล็ดอื่นๆ ข้าวโพด ข้าวฟ่าง มันฝรั่ง	0.20	n.a.	n.a.
	ผัก ผลไม้	0.05	n.a.	n.a.
	สาหร่าย	1.50	n.a.	n.a.
	น้ำผลไม้	0.20	n.a.	n.a.
	อาหารทะเล	n.a.	0.1	n.a.

ที่มา: [a] สถาบันอาหาร, 2549

[b] Codex, 2007

[c] Commission Regulation, 2006

n.a. หมายถึง ไม่มีการรายงาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 อ้อย

อ้อยเป็นพืชจัดอยู่ในตระกูลหญ้า เชื่อกันว่ามีจุดกำเนิดในเอเชียหรือประเทศนิวกินีในมหาสมุทรแปซิฟิก ซึ่งส่วนใหญ่จะเจริญเติบโตในเขตชลประทานน้ำฝน อ้อยนับเป็นพืชสำคัญอันดับ 4 ของโลก รองจากข้าวสาลี ข้าวโพด และข้าว ตามลำดับ ดังนั้นอ้อยจึงเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ อ้อยชอบอากาศร้อนและชุ่มชื้น ดังนั้นประเทศที่ปลูกอ้อย ซึ่งมีประมาณ 70 ประเทศ จึงอยู่ในแถบร้อนและชุ่มชื้น ในระหว่างเส้นรุ้งที่ 36.7 องศาเหนือและ 31 องศาใต้ (ดังรูปที่ 2.3) รวมทั้งประเทศไทยด้วย ที่สามารถปลูกได้เกือบทุกภาคของประเทศไทย ยกเว้นภาคใต้ เพราะสภาพอากาศภาคใต้ไม่เหมาะแก่การปลูกอ้อย มีฝนตกชุก และมีอากาศร้อนตลอดปี ซึ่งสภาพดังกล่าวทำให้อ้อยไม่หวาน (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2540a) อ้อยมีอายุเก็บเกี่ยวประมาณ 10-13 เดือน

รูปที่ 2.3 พื้นที่ที่มีการปลูกอ้อยในโลก
ที่มา: http://www.sugarcanecrops.com/introduction/

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของอ้อย

อ้อยมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Saccarum officinarum* L. จัดอยู่ในลำดับดังนี้

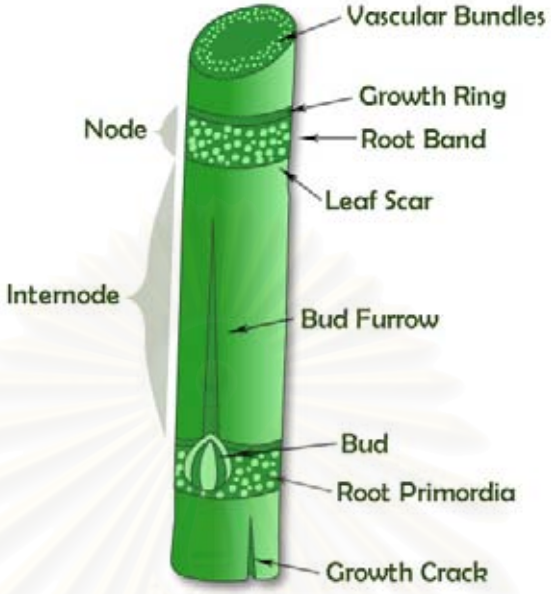
Class Momocotyledones
Order Glumaceae
Family Gramineae
Group Andropogoneae
Genus Saccharum

ในการแบ่งชนิด (Species) ของอ้อยได้แบ่งพืชในสกุลนี้ออกเป็น 4 ชนิดคือ 1) อ้อยปลูกดั้งเดิม (*S.officinarum* L.) 2) อ้อยป่าแถบร้อน (*S. spontaneum* L.) 3) อ้อยอินเดีย (*S. barberi* Jesw.) และ 4) อ้อยป่านิวกินี (*S. robustum* Brand. it Jesw. ex Grassl.)

กรมวิชาการเกษตร (2547) และเกษม สุขสถาน (2520) ได้แบ่งอ้อยเป็น 2 ชนิด คือ อ้อยโรงงาน (เช่น พันธุ์อู่ทอง 6 มุกดาหาร อู่ทอง 5 ขอนแก่น 1 เป็นต้น) และอ้อยเคี้ยว (เช่น พันธุ์สุพรรณบุรี 72 สุพรรณบุรี 50 เป็นต้น) โดยสามารถจำแนกลักษณะภายนอกของอ้อยไว้ ดังนี้

1) ลำต้น (Stalk)

ลำต้นของอ้อยเป็นส่วนสำคัญที่สุดในการขยายพันธุ์ และสะสมน้ำตาลแบ่งเป็นปล้องๆ (Inter Node) (ดังรูปที่ 2.4) ประกอบด้วยข้อและปล้องเป็นจำนวนมากเรียงติดต่อกัน 1) ข้อ หมายถึง ส่วนที่อยู่ระหว่างรอยกาบถึงวงเจริญ 2) ปล้อง คือ ส่วนตั้งแต่วงเจริญถึงรอยกาบที่อยู่เหนือขึ้นไป โดยทั่วไปมักจะเรียกสั้นๆ ว่าปล้อง ลำต้นประกอบด้วยหลายปล้องที่มีความยาวต่างกัน ตอนโคนสั้นมากและค่อยๆ ยาวขึ้นจนถึงยาวที่สุดแล้วลดลงเมื่อใกล้ยอด อ้อยอายุ 12 เดือน มีลำต้นสูงประมาณ 2-3 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5-5 เซนติเมตร มีปล้อง 20-30 ปล้อง เปลือกนอกจะแข็ง ลำต้นประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 2.4 ลักษณะของลำต้นอ้อย
ที่มา: http://www.sugarcanecrops.com/growth_morphology/stalk/

1.1) ตา (Bud หรือ Eye) เกิดที่ข้อในบริเวณเกิดราก บางข้ออาจไม่มีตาหรือมีมากกว่าหนึ่งตาก็ได้ เกิดสลับกัน ตาจะเจริญขึ้นมาเป็นอ้อยลำใหม่ (Primary Shoot)

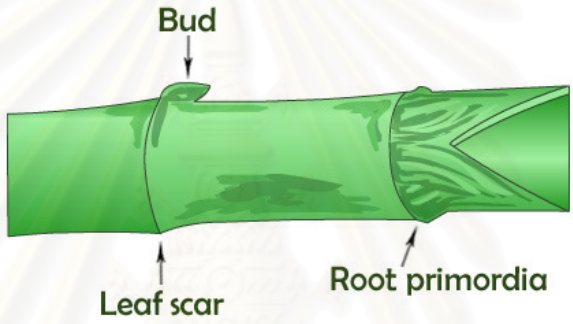
1.2) บริเวณเกิดราก (Root Band หรือ Root Ring หรือ Root Zone) บริเวณเกิดราก คือ อาณาเขตที่อยู่ระหว่างรอยกาบและวงเจริญเป็นที่เกิดของปุ่มราก

1.3) ปุ่มราก (Root Primordia หรือ Root Initials) มีลักษณะเป็นจุดเล็กๆ ในบริเวณเกิดราก รากจะเจริญออกมาจากปุ่มเหล่านี้ ปุ่มรากที่อยู่ตอนบนมีขนาดเล็กกว่าที่อยู่ตอนล่าง (ดังรูปที่ 2.5)

1.4) วงเจริญหรือวงแหวน (Growth Ring) คือ ส่วนที่มีลักษณะคล้ายวงแหวนเรียบอยู่เหนือบริเวณเกิดราก ไม่มีไขเกาะ ที่เรียกวงเจริญ ก็เพราะว่าส่วนนี้จะเจริญเติบโตอย่างเห็นได้ชัด เมื่ออ้อยล้มส่วนของวงเจริญด้านล่างจะยืดตัวมากกว่าด้านบน ทำให้ลำต้นตั้งขึ้น

1.5) รอยกาบ (Leaf Scar หรือ Sheath Scar) เป็นรอยที่เกิดขึ้นหลังจากกาบใบหลุดแล้ว การหลุดของกาบใบเป็นลักษณะประจำพันธุ์ บางพันธุ์กาบใบแห้งจะหลุดเอง บางพันธุ์ติดแน่นอยู่กับลำต้น ลักษณะต่างๆ ของรอยกาบ เช่น ความลาดเท และความยื่นของรอยกาบเป็นลักษณะประจำพันธุ์

1.6) วงไข (Wax Ring) คือ ส่วนที่อยู่ใต้รอยกาบ ส่วนนี้มักจะมีไขเกาะอยู่มากกว่าส่วนอื่นๆ ของลำต้น ส่วนที่เป็นวงไขอาจคอดหรือเสมอกับลำต้นซึ่งขึ้นอยู่กับพันธุ์ ตามปกติไขเป็นสีขาว แต่เมื่อเกิดเชื้อราจะเปลี่ยนเป็นสีเทาหรือดำ



รูปที่ 2.5 ลักษณะปุ่มรากที่ใช้ขยายพันธุ์ของอ้อย
ที่มา: http://www.sugarcanecrops.com/growth_morphology/propagation/

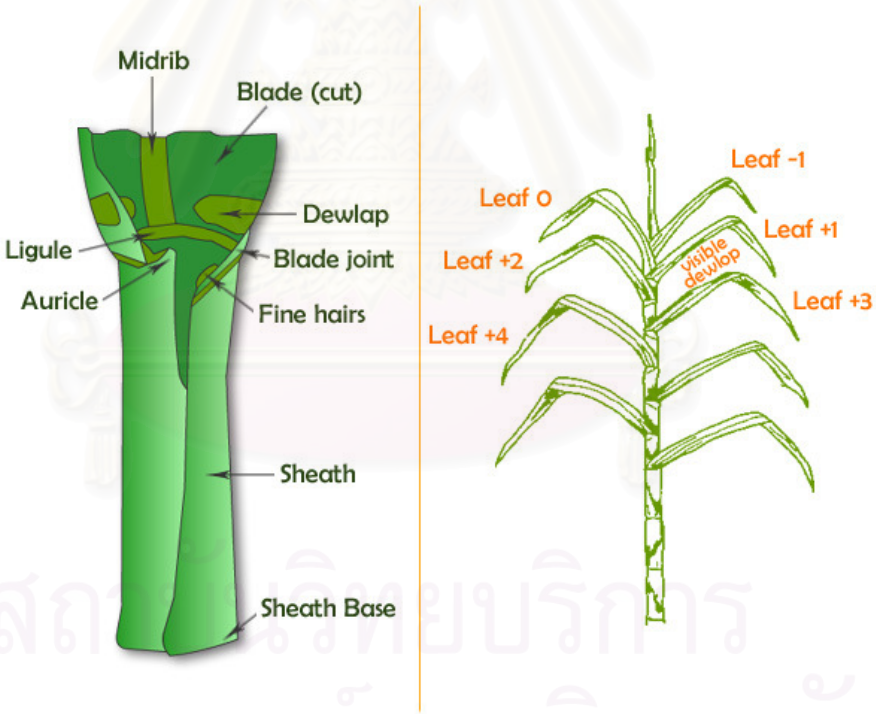
เมื่อตัดลำต้นออกตามขวาง (Cross Section) จะปรากฏส่วนที่แตกต่างกัน 3 ส่วน คือ 1) เปลือก (Hard Rind) เป็นส่วนนอกสุด ซึ่งมีความแข็งมาก ประกอบด้วยเซลล์ผิวหนา ซึ่งมีลิกนิน (Lignin) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ เปลือกทำหน้าที่ให้ลำต้นแข็งแรงและป้องกันส่วนที่อยู่ภายในลำต้น 2) เนื้ออ้อย (Flesh) อยู่ถัดเข้าไป นิ่มกว่า ประกอบด้วยเซลล์ที่ทำหน้าที่เก็บน้ำตาล (Parenchyma หรือ Storage Cells) และ 3) ไฟเบอร์ (Fiber) คือ ส่วนที่เป็นท่อน้ำ และท่ออาหาร จะเห็นได้ชัดเมื่อฝนรอยตัด ในลำต้นหนึ่งๆ มีท่อดังกล่าวอยู่ประมาณ 1,200 ท่อ ความหนาแน่นของไฟเบอร์มีมากที่บริเวณใกล้เปลือก และมีน้อยลงเมื่อใกล้จุดกึ่งกลางของลำต้น นอกจากนี้บริเวณใกล้จุดกึ่งกลางมักจะมีไส้ (Pith) รวมเป็นกลุ่มหรืออาจกระจายอยู่ทั่วไป

2) ตา (Bud)

ตาเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากในการจำแนกพันธุ์ รูปร่างของตามีตั้งแต่ค่อนข้างกลมจนถึงคล้ายสามเหลี่ยม ตำแหน่งของตา คือ ระยะระหว่างรอยกาบกับฐานตา ส่วนจุดงอก คือ จุดที่ต้นอ่อนจะโผล่ออกมาเมื่อตาเริ่มผลิ

3) ใบ (Leaf)

ใบประกอบด้วย 2 ส่วน คือ กาบใบ (Sheath) และแผ่นใบ (Blade) 1) กาบใบ คือ ส่วนที่ติดและหุ้มลำต้น 2) แผ่นใบ คือ ส่วนที่อยู่เหนือกาบใบขึ้นไป ประกอบด้วยเนื้อใบและแกนใบ ทั้งสองส่วนแยกจากกันที่คอใบ (Blade Joint) ด้านใน (ดังรูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 ลักษณะของใบอ้อย

ที่มา: http://www.sugarcanecrops.com/growth_morphology/the_leaf/

4) ช่อดอก (Inflorescence)

อ้อยที่ออกดอกแสดงว่าอ้อยนั้นหยุดเจริญทางด้านเยื่อแล้ว และน้ำตาลที่สะสมอยู่ในลำต้นได้ถูกนำไปใช้สร้างช่อดอกทำให้ความหวานลดลงเล็กน้อย ดอกอ้อยมีลักษณะเป็นพู่ การออกดอกของอ้อยมีปัจจัยอยู่หลายประการ เช่น ช่วงแสง (Photoperiod) หรือความยาวของวัน อุณหภูมิ ความชื้นในดินและอากาศ ความสูงจากระดับน้ำทะเล ทิศทางลมและสภาพของดินที่ปลูก เป็นต้น

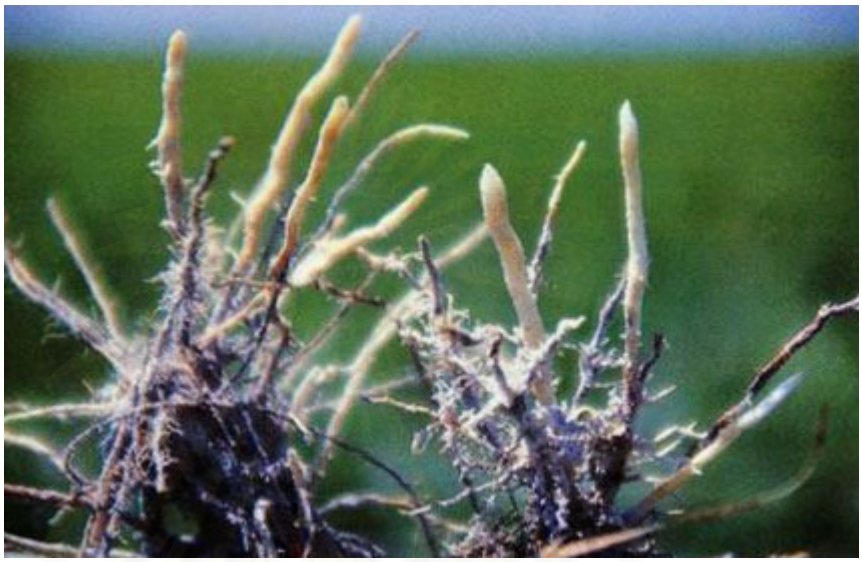
5) ราก

อ้อยมีระบบรากฝอย (Fibrous Root System) แผ่กระจายออกโดยรอบลำต้นในรัศมีประมาณ 50-100 เซนติเมตร ลึก 100-150 เซนติเมตร ปกติอ้อยขยายพันธุ์โดยใช้ลำต้นตัดเป็นท่อนๆ ละ 2-3 ตา แต่ละท่อนเรียกว่า ท่อนพันธุ์ (Sett หรือ Cutting หรือ Seed Piece หรือ Seed Cane) หลังจากนำท่อนพันธุ์ปลูกลงดิน ตาอ้อยจะบวมเป่ง แล้วงอกขึ้นเป็นต้นอ้อย ปุ่มรากที่อยู่ตรงข้อจะงอกรากออกมาหาอาหารเพื่อเลี้ยงต้นอ่อน จะปรากฏราก 2 ชุด (ดังรูปที่ 2.7) คือ

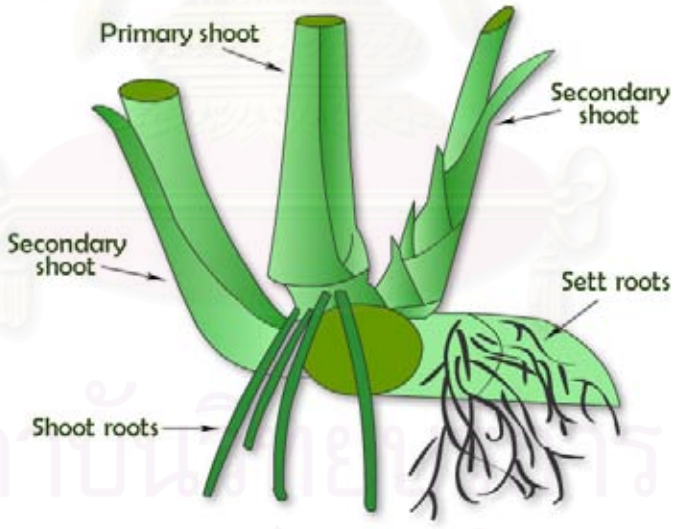
5.1) รากของท่อนพันธุ์ (Sett Root หรือ Cutting Root) หรือเรียกว่า รากชั่วคราว เป็นรากรุ่นแรก (Primary Root) ที่เกิดจากปุ่มรากในบริเวณเกิดรากของท่อนพันธุ์ รากพวกนี้มีลักษณะผอมแตกแขนงมาก ขณะที่ตาของท่อนพันธุ์กำลังเจริญเป็นหน่อ (Shoot) จะได้น้ำหรือความชื้น และธาตุอาหารในดินจากรากเหล่านี้ รากของท่อนพันธุ์จะทำหน้าที่ต่อไป จนกระทั่งหน่อมีรากของตนเอง ทำหน้าที่ดูดน้ำ และธาตุอาหารแทน หลังจากนั้นรากของท่อนพันธุ์ รวมทั้งตัวท่อนพันธุ์เดิมก็จะหมดสภาพไป

5.2) รากของหน่อ (Shoot Root) หรือเรียกว่า รากถาวร เป็นรากรุ่นที่ 2 (Secondary Root) ที่เกิดจากปุ่มรากของหน่อที่เกิดจากท่อนพันธุ์นั้น รากนี้มีลักษณะสมบูรณ์ขนาดใหญ่กว่ารากชนิดแรก เมื่อเกิดใหม่ๆ มีลักษณะอวบ ไม่มีแขนง สีขาว และสีจะเปลี่ยนเป็นน้ำตาลเข้มเมื่ออายุมากขึ้น รากจะเจริญออกมาจากปุ่มรากเท่านั้น แม้ว่าปุ่มรากของแต่ละข้อจะมีจำนวนจำกัด แต่เนื่องจากส่วนโคนของลำต้นที่อยู่ใต้ดินมีปล้องถี่มากทำให้มีรากมาก การเจริญของรากจะเกิดอย่างต่อเนื่อง และการแตกสาขาไม่มีขอบเขตจำกัด รากใหม่จะเกิดมาทำหน้าที่แทน โดยเฉพาะในดินที่เหมาะสม การแพร่ของรากก็จะไปได้ไกลและลึก สามารถหยั่งในแนวดิ่ง

และแนวนอนได้มากกว่า 100 เซนติเมตร นอกจากรากที่อยู่ใต้ดินแล้วยังมีรากที่เกิดจากข้อเหนือพื้นดินทั้งข้อที่อยู่ใกล้ผิวดิน และสูงขึ้นไป อ้อยบางพันธุ์อาจมีรากยาวที่ข้อซึ่งอยู่ห่างจากพื้นดินมาก



1)



2)

รูปที่ 2.7 ลักษณะของราก 1) ลักษณะของรากเกิดใหม่ 2) ระบบรากของอ้อย

ที่มา: http://www.sugarcanecrops.com/growth_morphology/the_root_system/

2.2.2 การเจริญเติบโตของอ้อย (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2540a)

เริ่มตั้งแต่ปลูกด้วยท่อนพันธุ์จนถึงการเก็บเกี่ยวอ้อย มีการเจริญเติบโต ซึ่งพอจะแบ่งออกได้เป็น 4 ระยะ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.8 ดังนี้

1) ระยะงอก (Germination Phase)

ระยะนี้เริ่มตั้งแต่ปลูกจนกระทั่งหน่อโผล่พ้นดิน ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 2-3 สัปดาห์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น พันธุ์ การปฏิบัติต่อท่อนพันธุ์ และความหนาของดินที่กลบท่อนพันธุ์ เป็นต้น หน่อที่เกิดจากตาของท่อนพันธุ์เรียกว่า หน่อแรก (Primary Shoot) หรือ หน่อแม่ (Mother Shoot)

2) ระยะแตกกอ (Tillering Phase)

ระยะแตกกอเป็นระยะต่อเนื่องกับระยะงอก ในระยะงอกอ้อยแต่ละตา จะงอกขึ้นมาเพียงต้นเดียว และเมื่อเติบโตจึงจะมีการแตกกอ การแตกกอเป็นลักษณะสำคัญของพืชตระกูลหญ้า รวมทั้งอ้อย เนื่องจากตาที่อยู่ส่วนโคนของลำต้นใต้ดินของหน่อแรกเจริญออกมาเป็นหน่อชุดที่สอง และจากหน่อชุดที่สองก็เจริญเป็นหน่อชุดที่สามต่อๆ ไป ทำให้มีจำนวนหน่อหรือลำต้นเพิ่มขึ้น การแตกกอจะเริ่มเมื่ออายุประมาณ 1.5 เดือนเป็นต้นไป แต่ระยะที่มีการแตกกอมากที่สุดอยู่ระหว่าง 2.5-4 เดือน หน่อที่อ่อนแอกว่าจะตายไป เพราะการแข่งขันกันเพื่อปัจจัยในการเจริญเติบโต เช่น แสงแดด อุณหภูมิ (ที่เหมาะสมประมาณ 30 องศาเซลเซียส ถ้าต่ำว่า 20 องศาเซลเซียสจะทำให้ระยะแตกกอช้าลง) น้ำหรือความชื้น และธาตุอาหาร เป็นต้น (Vered and Rao, 2007) จำนวนลำต้นต่อกอขณะเก็บเกี่ยวขึ้นอยู่กับจำนวนหน่อในระยะแตกกอนี้

3) ระยะย่างปล้อง (Stalk Elongation Phase หรือ Grand Growth Phase)

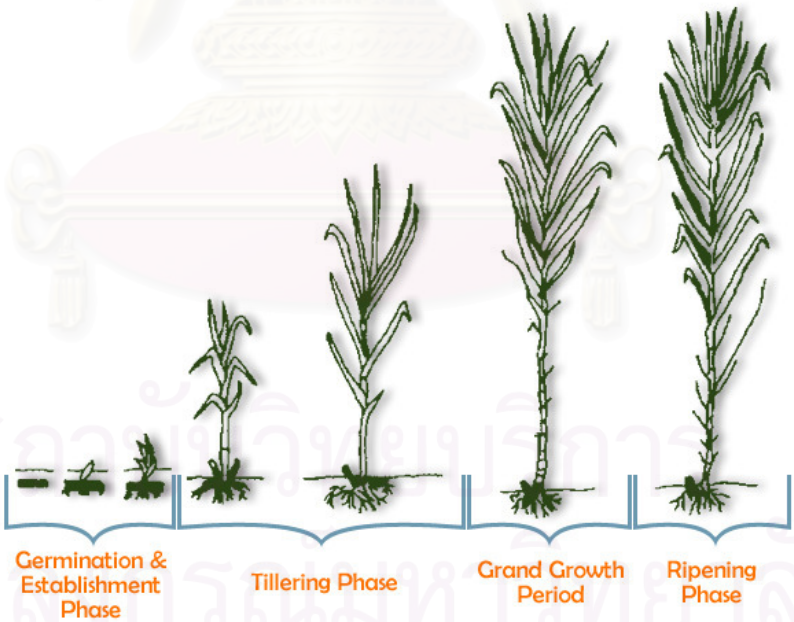
เป็นระยะต่อเนื่องกับการแตกกอ ระยะนี้จะมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของปล้องอย่างรวดเร็ว (Actual Cane Formation and Elongation) ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่อายุประมาณ 3-4 เดือน จนถึงอายุประมาณ 7-8 เดือน (Vered and Rao, 2007) หลังจากนั้นการเจริญเติบโตจะน้อยลง และเริ่มมีการสะสมน้ำตาลเพิ่มขึ้น ขนาดและความยาวของ

แต่ละต้นในระยะนี้ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับน้ำหนักของแต่ละลำต้น และน้ำหนักแต่ละลำต้นมีผลโดยตรงต่อผลผลิตน้ำหนักของอ้อยเมื่อเก็บเกี่ยว

4) ระยะแก่และสุก (Maturation and Ripening Phase)

ระยะแก่ คือ ระยะที่มีอัตราการเจริญเติบโตช้าลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับระยะต่างๆ เมื่อการเจริญเติบโตเริ่มช้าลง น้ำตาลที่ใบสร้างขึ้นจากการสังเคราะห์แสงก็จะถูกใช้น้อยลง และมีเหลือเก็บสะสมในลำต้นมากขึ้น ซึ่งเป็นการเริ่มต้นของระยะสุก การสะสมน้ำตาลจะเริ่มจากส่วนโคนไปหาปลาย ดังนั้นส่วนโคนจึงหวานก่อน และมีความหวานมากกว่าส่วนปลาย โดยเฉพาะส่วนกลางและส่วนปลายมีความหวานใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ การสะสมน้ำตาลจะมีมากขึ้นตามลำดับ

การเจริญเติบโตและการสะสมน้ำตาลของอ้อยมิได้เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ขณะที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วนั้น น้ำตาลที่ใบสร้างขึ้นส่วนใหญ่จะถูกใช้ไปเพื่อการเจริญเติบโต จึงเหลือเก็บสะสมไว้ภายในลำต้นเพียงส่วนน้อย เมื่อการเจริญเติบโตช้าลงจึงมีการสะสมน้ำตาลมากขึ้น



รูปที่ 2.8 ระยะการเจริญเติบโตของอ้อย

ที่มา: http://www.sugarcanecrops.com/crop_growth_phases/

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของอ้อย

1) แสงแดด

อ้อยเป็นพืชที่ต้องการแสงแดดมากกว่าพืชอื่นๆ และเป็นแสงที่จ้า และได้รับเป็นเวลานาน โดยเฉพาะในระยะที่อ้อยกำลังแตกกอ และย่างปล้อง แสงทำให้อ้อยสร้างสารสีม่วง (Anthocyanin) ขึ้นที่เปลือกโดยจะเห็นได้ชัดเมื่ออ้อยทิ้งกาบใบออก นอกจากนี้แสงสว่างยังมีอิทธิพลต่ออ้อยคือ ทำให้ระบบรากมีการเจริญอย่างเหมาะสม เพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบมากขึ้นทำให้ใบเขียว

2) ดิน

อ้อยสามารถปลูกได้ในดินเกือบทุกประเภท ตั้งแต่ดินร่วนถึงดินร่วนปนทราย แต่ดินที่เหมาะสมในการปลูกอ้อยคือ ดินร่วนปนดินเหนียว พื้นที่ปลูกควรเป็นที่ราบ ควรหลีกเลี่ยงการปลูกอ้อยในดินเหนียวจัด ดินทรายจัดและดินลูกรัง รากอ้อยมักจะชอนไชไปในดินที่มีสิ่งกีดขวางน้อยที่สุด ถ้าไปพบดินที่แน่นหรือมีสิ่งกีดขวางรากอ้อยจะแผ่ตัวออกทางแบนแล้วเปลี่ยนทิศทาง การเจริญเติบโตของต้นอ้อยจะลดลงเมื่อรากเจริญผ่านดินที่แน่นมากๆ และมีช่องว่างในดินน้อย ระดับความลึกของรากอ้อยอยู่ประมาณ 30-60 เซนติเมตรจากผิวดินเป็นช่วงที่รากอ้อยหาอาหารและน้ำได้ดีที่สุดแต่รากอ้อยที่มีอายุมากสามารถลงลึกถึง 1.2 เมตร

2.1) คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน

ดินเป็นแหล่งให้อากาศ น้ำ และธาตุอาหารแก่อ้อย สภาพทางฟิสิกส์ของดินเลวเกิดขึ้นโดยทางธรรมชาติ หรือจากการใช้รถบรรทุกหรือเครื่องมือขนาดใหญ่เหยียบย่ำ หรือการให้น้ำชลประทานมากเกินไป ซึ่งจะไปมีผลกระทบต่อปริมาณน้ำและอากาศในดิน เนื่องจากดินที่ถูกอัดจนแน่นจนทำให้โครงสร้างของดินถูกทำลายจะทำให้ดินบริเวณรากมีอากาศไม่เพียงพอ ซึ่งมีผลทำให้รากอ้อยเจริญเติบโตไม่ดีเท่าที่ควร เมื่อความหนาแน่นของดิน (Bulk Density) Pore Size Distribution และ Aggregate Stability เปลี่ยนแปลงจะทำให้การถ่ายเทอากาศในดิน (Soil Aeration) เปลี่ยนแปลง ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการแลกเปลี่ยนออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างดินกับบรรยากาศ

2.2) คุณสมบัติทางเคมีของดิน

สมบัติทางเคมีของดินมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของอ้อย โดยทั่วไปการปลูกพืชเพื่อให้ผลดีจำเป็นต้องใส่ปุ๋ยหรือเพิ่มธาตุอาหารพืชให้แก่ดิน ปริมาณธาตุอาหารพืชที่ใช้ประโยชน์ได้ในดินมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ เนื่องจากดินมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

2.3) จำนวนจุลินทรีย์ในดิน

เชื้อราและไส้เดือนฝอย เป็นสาเหตุที่ทำให้ผลผลิตของอ้อยลดลง จำนวนและชนิดของจุลินทรีย์ดินมักเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี ตลอดจนคุณสมบัติทางชีววิทยาของดินที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ดินที่มีความเป็นทราย มักไม่พบไส้เดือนฝอย

2.4) ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (pH)

รากอ้อยเจริญเติบโตเมื่อดินมีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง อยู่ระหว่าง 6.1-7.7 ซึ่งค่า pH ที่เหมาะสม คือ 6.5 ดินที่ใช้ปลูกจะต้องไม่เป็นกรดหรือด่างมากเกินไป และควรมีธาตุอาหารสมบูรณ์ ถ้าดินเป็นกรดให้ใส่ปูนเพื่อปรับสภาพ แต่ถ้าดินเป็นด่างให้ใส่ยิบซั่มปรับสภาพดิน อ้อยมักอ่อนแอต่อดินเค็ม และผลผลิตจะลดลงถ้าดินมีความเค็มมากขึ้น วัดโดยใช้ค่าความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC) ซึ่งถ้าค่า EC มากถึง 18.6 mmhos/cm จะทำให้ผลผลิตลดลง 100%

3) อุณหภูมิ

อ้อยเป็นพืชที่ชอบขึ้นในเขตอบอุ่นหรือเขตร้อนชื้น มีแสงแดดพอเพียง อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การงอกของท่อนพันธุ์อ้อย ได้แก่ 30-38 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เหมาะแก่การเจริญเติบโตของอ้อย โดยเฉลี่ยประมาณ 22-30 องศาเซลเซียส อุณหภูมิต่ำสุดที่เหมาะแก่การเจริญเติบโตอ้อยไม่ควรต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงใกล้เก็บเกี่ยวอ้อย ไม่ควรต่ำกว่า 10-20 องศาเซลเซียส มิฉะนั้นจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของอ้อยและปริมาณน้ำตาลในอ้อย

4) ปริมาณและการกระจายของน้ำฝน

การเจริญเติบโตของอ้อยเป็นการขยายตัวของเซลล์ที่ดูดน้ำเข้าไป ดังนั้นการเจริญเติบโตของอ้อยจึงมีสหสัมพันธ์ต่อความชื้นในอากาศและปริมาณน้ำที่ได้รับ ผลผลิตของอ้อยจึงมีความปรวนแปรไปตามจำนวนน้ำฝนเฉลี่ย ถ้าฝนตกมากเกินไปในฤดูฝนทำให้อัตราการเจริญเติบโตของอ้อยลดลงในบริเวณที่มีการระบายน้ำไม่ดี ถ้ามีฝนตกเบาๆ และมีน้ำค้างมากมีผลทำให้อ้อยเจริญเติบโตได้ดี เพราะอ้อยสามารถดูดความชื้นโดยทางใบและกาบใบได้ ฝนที่ตกเบาๆ ทำให้ใบอ้อยสะอาดและช่วยเพิ่มความชื้นในอากาศ ซึ่งจะช่วยลดการคายน้ำของอ้อยลงได้

5) ความชื้นในดิน

อ้อยเป็นพืชที่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ในสภาพของดินที่มีระดับความชื้นแตกต่างกันอย่างมาก บางพันธุ์สามารถทนทานต่อความชื้นในดินได้สูงมาก

6) ลม

อ้อยที่ถูกลมพัดจัดจะทำให้อ้อยแคระแกร็น เนื่องจากมีการคายน้ำมาก อัตราการเจริญเติบโตของ Shoot : Root จะน้อยกว่าอ้อยที่ไม่ถูกลมพัดจัด แสดงว่าอ้อยที่ไม่ถูกลมพัดจะมีโอกาสสร้างลำต้นและใบได้ดีกว่าอ้อยที่ปลูกอยู่ทางด้านที่ถูกลมมาก

7) การแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์และพื้นที่ใบ

อ้อยดูดคาร์บอนไดออกไซด์ในรูป CO_2 เข้าไปสู่เซลล์พาลิเสดพาเรนไคมา (Palisade Parenchyma) และเมโซฟิลล์เซลล์ (Mesophyll Cell) ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการสังเคราะห์แสงโดยเข้าทางปากใบ (Guard Cell) การที่อ้อยมีความสามารถในการสังเคราะห์แสงได้มากย่อมขึ้นอยู่กับเนื้อที่ใบด้วย อย่างไรก็ตามได้มีการทดลองตัดใบอ้อยในขณะที่กำลังเจริญเติบโต ปรากฏว่าปล้องอ้อยมีขนาดเล็กลงเนื่องจากมีการสังเคราะห์แสงไม่สมบูรณ์ แต่เมื่อปล่อยให้ใบอ้อยถัดขึ้นมามีขนาดโตขึ้นจนโตเต็มที่ ปล้องอ้อยที่ถัดขึ้นมาก็มีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์แสงได้ผลเต็มที่ ดังนั้น คาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการสังเคราะห์แสง หากแต่การขาดแคลนคาร์บอนไดออกไซด์ยังไม่เคยมีปัญหาเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม การขาด

คาร์บอนไดออกไซด์อาจเกิดจากมลภาวะในอากาศที่ก๊าซอื่นๆ ซึ่งไม่เหมาะสมในการเจริญเติบโต ปะปนมาในอากาศทำให้อ้อยสังเคราะห์แสงไม่ได้เต็มที่

8) ธาตุอาหาร

การใส่ปุ๋ยถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการปลูกอ้อย โดยเฉพาะดินที่ปลูกอ้อยมานาน การใส่ปุ๋ยควรจะใส่ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพืชสด หรือปุ๋ยอื่นๆ ที่ช่วยปรับสภาพทางกายของดินร่วมกับปุ๋ยเคมี ปุ๋ยเคมีที่ใส่ควรมีธาตุอาหารครบทั้ง 3 ธาตุ คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม (N-P-K) ซึ่งการใส่ปุ๋ยในการปลูกอ้อยนั้นจะกระทำ 2 ครั้ง คือ

8.1) ปุ๋ยรองก้นหลุม (ปุ๋ยรองพื้น)

ปุ๋ยรองก้นหลุม หมายถึง ปุ๋ยที่ใส่ก่อนปลูก หรือใส่ครั้งที่หนึ่ง โดยเมื่อเปิดร่องเสร็จให้นำปุ๋ยใส่ในร่องแล้วกลบก่อนวางท่อนพันธุ์ ปุ๋ยรองพื้นควรมีธาตุอาหารอย่างน้อย 2 ธาตุ การใส่ปุ๋ยขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของดินแต่ละพื้นที่ โดยเฉพาะดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีลักษณะเป็นดินปนทราย ความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำ หากไม่มีการใส่ปุ๋ยรองพื้น จะทำให้อ้อยที่งอกขึ้นมาไม่สมบูรณ์ มีการแตกหน่อน้อย อ่อนแอต่อโรคและแมลง

8.2) ปุ๋ยแต่งหน้า

ปุ๋ยแต่งหน้า หมายถึง ปุ๋ยที่ใส่ครั้งที่สอง เมื่ออ้อยอายุ 2.5-3 เดือน คือ อยู่ในระยะแตกกอถึงย่างปล้อง ปุ๋ยที่ใช้ส่วนมากเป็นปุ๋ยที่มีธาตุไนโตรเจนอย่างเดียว เช่น แอมโมเนียมซัลเฟต 21-0-0 ใส่ในอัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

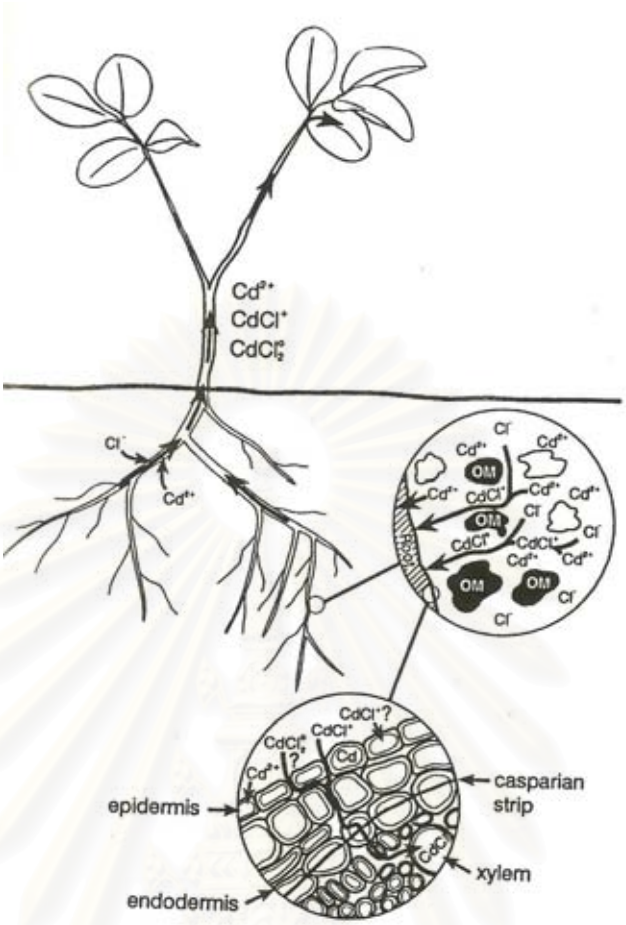
2.3 การดูดดึงโลหะหนักของพืช

ดินที่ไม่มีการปนเปื้อนจะมีแคดเมียมต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่ก็สามารถมีได้ถึง 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ขึ้นอยู่กับดินต้นกำเนิด แคดเมียมเป็นมลพิษที่มีอันตราย มีความเป็นพิษสูง และบางรูปแบบสามารถละลายได้ในน้ำ ซึ่งที่ระดับความเข้มข้นต่ำแคดเมียมจะไม่เป็นพิษกับพืช แต่ถ้ามีระดับความเข้มข้นสูงขึ้น จะเป็นพิษต่อพืช สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของรากและเซลล์ของพืชได้ เช่น หัวหอม กระเทียม และถั่ว (Jiang et al., 2001: 9; Wang et al., 2007: 82)

ปกติปริมาณจุลธาตุ (Trace Element) ที่มีอยู่ในดินที่ปราศจากการปนเปื้อนของของเสียอันตราย มีค่าผันแปรได้ตามวัตถุต้นกำเนิด (Parent Materials) ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (Organic Matter) เนื้อดิน (Soil Texture) และระดับความลึกของดิน (Soil Depth) เป็นต้น

2.3.1 รูปของแคดเมียมในดิน

แคดเมียมในหินอัคนี (Magmatic Rocks) และหินตะกอน (Sedimentary Rocks) จะมีปริมาณไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในการสลายตัวของดิน แคดเมียมจะอยู่ในสภาพละลายน้ำได้ง่าย และอยู่ในรูปแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) และสามารถอยู่ในรูปไอออนแคดเมียมเชิงซ้อน (Complex Ions) อื่นด้วย เช่น $CdCl^{+}$ $CdOH^{+}$ $CdHCO_3^{+}$ $CdCl_2^{0}$ $CdCl_3^{-}$ $CdCl_4^{2-}$ $Cd(OH)_3^{-}$ และ $Cd(OH)_4^{2-}$ ยกตัวอย่างเช่น ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนสูง ทำให้การดูดดึงแคดเมียมในพืชมีเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในดิน ทำให้ความเข้มข้นของแคดเมียมในพืชเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า การดูดดึงแคดเมียมในพืชดังกล่าวเป็นผลมาจากเกลือคลอไรด์ (Cl^{-} Salinity) ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.9 อย่างไรก็ตาม วาเลนซี่ที่สำคัญที่สุดของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมธรรมชาติคือ +2 และปัจจัยสำคัญที่สุดในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแคดเมียมไอออนคือ พีเอช (pH) และออกซิเดชั่นโพแทนเชียล (Oxidation Potential) ภายใต้สภาวะที่เกิดออกซิเดชั่นอย่างแรงแคดเมียมจะอยู่ในรูปสารประกอบ เช่น แคดเมียมออกไซด์ (CdO) แคดเมียมคาร์บอเนต ($CdCO_3$) หรืออาจอยู่ร่วมกับฟอสเฟตได้เช่นเดียวกัน (McLaughlin และคณะ, 1994; Smolders และ McLaughlin, 1996; Grant และคณะ, 1999: 180; Helmke, 1999: 43; Kabata-Pendias และ Pendias, 2000: 143-144; Kirkham, 2006)



รูปที่ 2.9 กลไกการดูดดึงแคดเมียมในรูปเกลือคลอไรด์จากดินของพืช
ที่มา: Grant และคณะ, 1999: 181

2.3.2 กลไกการดูดดึงแคดเมียมของพืช

สำหรับกลไกพื้นฐานของการดูดดึงแคดเมียมจากดินของพืช ที่เป็นตัวควบคุมการดูดดึงแคดเมียมในพืชยากที่จะอธิบายให้เข้าใจได้ หากแต่จากการศึกษาถึงหลักการของการสะสมแคดเมียมในพืช จึงสามารถบอกถึงกลไกการดูดดึงแคดเมียมได้ ซึ่งประกอบด้วย 1) การดูดดึงของแคดเมียมจากสารละลายที่บริเวณผิวของราก 2) การดูดซึม (Absorption) และการลำเลียง (Transport) ของแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ไปตามเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell Plasma Membranes) ของเซลล์ราก โดยถูกควบคุมโดยความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Potential) ของกิจกรรมของแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ระหว่างในไซโตพลาสซึม (Cytosol) ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีของเซลล์พืช และเป็นที่เก็บสะสมของวัตถุดิบสำหรับเซลล์ และในอะโพพลาสซึม

(Apoplasms) ของราก ซึ่งเป็นกระบวนการดูดซึมธาตุโลหะโดยกระบวนการทางฟิสิกส์ ที่เรียกว่า Passive Absorption ทำให้แคดเมียมถูกดูดผ่านภายในรากพืชทางช่องว่างระหว่างเซลล์ (Free Space) นอกจากนี้ โลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูง ก็สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้อย่างรวดเร็วด้วย โดยมีการเคลื่อนที่ผ่านทางเอนโดเดอร์มิส (Endodermis) ซึ่งเป็นเนื้อเยื่อที่อยู่ด้านนอกของเนื้อเยื่อลำเลียงของรากเพื่อเข้าไปสู่ท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) หากแต่สารประกอบแคดเมียมเชิงซ้อนที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ (Organic) ส่วนใหญ่มีการเคลื่อนย้ายทางท่ออาหาร (Phloem) 3) การเคลื่อนที่ภายใน และระหว่างเซลล์ของแคดเมียม และ 4) ระยะทางของการเคลื่อนย้าย (Translocation) และการสะสม (Deposition) ของแคดเมียมในส่วนของพืช เป็นต้น นอกจากนี้ กิจกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นในบริเวณของราก ซึ่งแคดเมียมสามารถละลายเพิ่มขึ้นได้ ในบริเวณที่เรียกว่า ไรโซสเฟียร์ (Rhizosphere) นั้น ก็อาจมีผลทำให้ปริมาณของแคดเมียม มีความสามารถในการแพร่กระจายออกไปยังผิวของรากด้วยเช่นกัน (McLaughlin และ Singh, 1999: 260; Welch และ Norvell, 1999: 125-127)

2.3.3 **ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมโลหะหนักในดินและพืช**

1) ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

ดินมีประจุทั้งบวกและลบ แต่จะมีค่าประจุลบมากกว่า ด้วยความเป็นประจุนี้นับว่ามีประโยชน์อย่างมาก เพราะธาตุอาหารของพืชโดยส่วนใหญ่มีประจุเป็นบวก จึงถูกดินดูดซับเอาไว้ ทำให้พืชดึงดูดเอาไปใช้ได้ แคดเมียมเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 4.5 ถึง 5.5 ซึ่งสภาพละลายได้ (Solubility) ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัมและปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ในขณะที่ดินเป็นด่าง แคดเมียมไม่ค่อยเคลื่อนที่ ดังนั้นการใส่ปูน เพื่อลดความเป็นกรดจะสามารถลดการละลายได้ และทำให้ลดการดูดดึงของพืชได้เช่นกัน (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545)

พืชสามารถเจริญเติบโตได้ในค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่แตกต่างกัน โดยพืชส่วนมากสามารถเจริญเติบโตดีที่สุดในดินจะมีค่าความเป็นกรดอ่อน (Slightly Acid Soil) มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) 6.5-6.8 ในขณะที่พืชบางชนิด เช่น พืชตระกูลถั่ว ชอบดินที่เป็นกลาง (Neutral Soil) (pH 7.0) มากกว่าดินกรด (pH <7.0) (Kohnke and Franzmeier, 1995) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ชนิดพืชที่สามารถเจริญเติบโตในดินที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างแตกต่างกัน

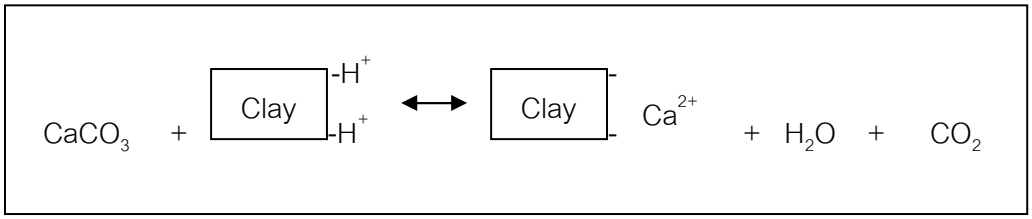
ความเป็นกรดน้อย pH 6.5-7.0	ความเป็นกรดปานกลาง pH 5.5-6.4	ความเป็นกรดจัด pH 4.5-5.4	ความเป็นกรดรุนแรง pH ต่ำกว่า 4.5
ทานตะวัน	ถั่วเหลือง	ชา	แตงโม
มันสำปะหลัง	ยาสูบ	สับปะรด	แห้ว
กะหล่ำปลี	ข้าวฟ่าง	ปอเทือง	มะกอก
แตงกวา	ข้าวโพด	สตรอเบอรี่	มะดัน
หอมใหญ่	ฝ้าย	แครอท	
พริกไทย	มะนาว	ข้าว	
กล้วย	มะม่วง	ยางพารา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

ที่มา: อภิรดี อิ่มเอิบ, 2534 อ้างถึงใน มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544: 57

ดินที่เป็นกรด (Low pH) มีสาเหตุมาจากการยึดจับของไฮโดรเจนไอออน (Hydrogen ions) ที่มากเกินพอกับอนุภาคของดินเหนียว (Clay Particles) ซึ่งในสภาวะเช่นนี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการเติมปูน (Lime; Calcium Carbonate) จะทำให้ดินเกิดความสมดุลย์ขึ้น ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 การปรับสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของดินให้เหมาะสมจะทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดี สามารถกำจัดสารมลพิษให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

Pepper และคณะ (1983) ได้ศึกษาการใช้ปูนในการควบคุมการใช้ข้าวโพดหมัก (Silage Corn) ในการดูดดึงสังกะสี และแคดเมียมในกากตะกอน พบว่า เมื่อเติมปูนจาก pH 4.5 จนถึง 6.5 ข้าวโพดมีการดูดดึงแคดเมียมลดลง ดังนั้น การใช้ประโยชน์ได้ของแคดเมียมในพืชจะลดลง เมื่อดินมีความเป็นด่าง (Alkaline) หรือมีค่า pH ในดิน (Soil pH) เพิ่มขึ้น (Bell และคณะ, 2001)

Escrig และ Morell (1998) รายงานว่า การเติมเกลือแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ลงไปในดิน ทำให้ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมลดลง 3 เท่า เมื่อเติมเกลือในปริมาณ 10 เท่า เนื่องจากไอออน Ca^{2+} สามารถแทนที่ Cd^{2+} ได้ (Kabata-Pendias และ Pendias, 2000: 154)



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาของแคลเซียมคาร์บอเนตกับอนุภาคของดินเหนียว
ที่มา: Kohnke และ Franzmeier, 1995

2) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity; CEC)

ดินมีประจุไฟฟ้าเนื่องมาจากอนุภาคดินเหนียว (Clay Mineral) และอินทรียวัตถุ (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/100 g (Keeney and Wilding, 1977 อ้างถึงใน ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) ได้แสดงระดับ CEC ของดินไว้ในตารางที่ 2.6 ถ้าระดับ CEC ของดินต่ำ แสดงว่าดินชนิดนั้นมีปริมาณอนุภาคดินเหนียวหรืออินทรียวัตถุน้อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.6 ระดับ CEC ของดิน

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

ที่มา: ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545

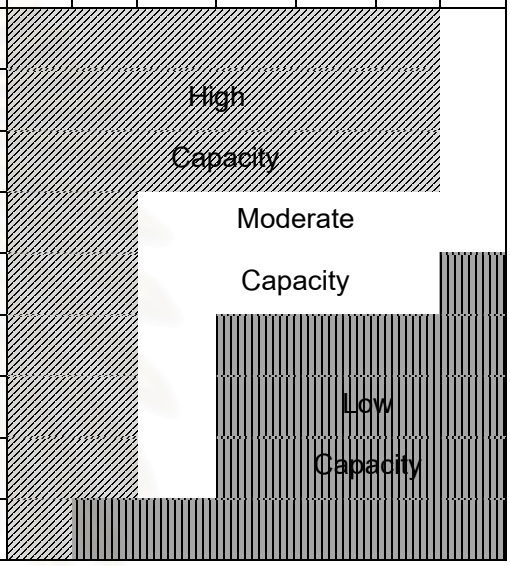
ศิริลักษณ์ กล้าการขาย และธนูชัย กองแก้ว (2005) ได้ศึกษาการใช้หญ้าแฝกกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยทำการศึกษาการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ซึ่งพบว่า ค่า CEC ในชุดดินท่าเรือเท่ากับ 24.6 และชุดดินอุบลเท่ากับ 1.8 centimoles of positive charge per kilogram (c $mole_{(+)}$ kg^{-1}) และจากการศึกษาในครั้งนี้ยังพบว่า หญ้าแฝกสายพันธุ์เลยสามารถดูดดึงแคดเมียมไว้ที่ใบได้มากกว่าสายพันธุ์อินเดียพระราชทาน และสายพันธุ์ศรีลังกาอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) แต่ไม่แตกต่างจากสายพันธุ์นครสวรรค์ และสายพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ ส่วนการดูดดึงไปไว้ที่รากไม่มีความแตกต่างกัน สำหรับชุดดินที่มีค่า CEC สูงสามารถดูดดึงแคดเมียมได้ดี และมีการปล่อยแคดเมียมได้ยากกว่าชุดดินที่มีค่า CEC ต่ำ ทำให้หญ้าแฝกที่ปลูกในชุดดินอุบลดูดดึงแคดเมียมได้มากกว่าชุดดินท่าเรือ

3) เนื้อดินและโครงสร้างของดิน

โครงสร้างของดินเกิดจากการเกาะยึดกันของอนุภาคดิน และมีตัวเชื่อมทั้งสารอินทรีย์และไอออนต่างๆ ทำให้มีความเสถียรของรูปทรง ลักษณะของเนื้อดินและโครงสร้างของดินจึงมีอิทธิพลต่อความพรุนของดิน การอุ้มน้ำ การระบายน้ำและอากาศ การชอนไชของราก ดังนั้นพื้นที่ผิวสัมผัสของเนื้อดินแต่ละชนิดย่อมมีผลต่อการดูดซับโลหะด้วย (ดังรูปที่ 2.11) โดยดินที่มีพื้นที่ผิวรวมของอนุภาคมากกว่าจะดูดซับไอออน ซึ่งเป็นธาตุอาหารได้มากกว่าด้วย ลักษณะของโครงสร้างดินที่พืชต้องการ คือ ไม่ขัดขวางการเจริญเติบโตของราก มีการถ่ายเทอากาศและการระบายน้ำในดินได้ดี

สามารถอุ้มน้ำให้กับพืชได้ มีลักษณะเอื้อประโยชน์ต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช เป็นที่ยึดเกาะของรากได้ดี (Kohnke และ Franzmeier, 1995; ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545)

Soil property				Capacity						
Texture	S.A.(cm^2/g)	%Fe_2O_3	%Clay	Cu	Pb	Be	Zn	Cd	Ni	Hg
Clay	67	23	52							
Silty Clay	120	5.6	29							
Clay	122	3.7	46							
Sandy Loam	38	1.7	61							
Clay	51	17	61							
Silty Clay Loam	62	4	31							
Sand	9	1.8	5							
Sandy Loam	20	1.8	15							
Loamy Sand	8	0.6	4							



รูปที่ 2.11 ความสามารถของเนื้อดินในการดูดยึดโลหะ
ที่มา: WHO, 1992
หมายเหตุ: S.A. หมายถึง พื้นที่ผิวสัมผัส (Surface Area)

Bell และคณะ (2001) รายงานว่า ดินทราย (Sandy Soils) ซึ่งเป็นดินที่มีปริมาณดินเหนียว (Clay) และอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter) ต่ำ พบว่า พืชส่วนใหญ่สามารถดูดดึงแคดเมียมไปใช้ได้สูงกว่าพืชที่ปลูกในดินเหนียว (Clay Soils)

4) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

อินทรีย์วัตถุมีประจุลบ (Net Negatively Charge) อยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้มีความสามารถในการดูดยึดประจุบวกสูงกว่าคอลลอยด์อื่นๆ ประมาณ 2-30 เท่า จึงทำให้ดินที่มีอินทรียวัตถุสูง มีความต้านทานการเปลี่ยนแปลงของ pH ได้ดี (Adriano, 2001: 295) อย่างไรก็ตามอินทรีย์วัตถุมีส่วนที่เป็นประจุบวกอยู่บ้าง ซึ่งความสามารถดังกล่าว ช่วยป้องกันไม่ให้โลหะ

หนักละลายสูญหายไปกับน้ำโดยง่าย แคตไอออนที่เป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) ถูกอินทรีย์วัตถุดูดซับเอาไว้ทำให้โอกาสที่ pH จะเปลี่ยนแปลงย่อมเกิดได้ยาก ดังนั้น ถ้าในดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุที่เหมาะสม โอกาสที่โลหะจะออกสู่สารละลายดินก็น้อยลง ซึ่งเป็นผลมาจากความต้านทานการเปลี่ยนแปลง pH (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) นอกจากนี้ อินทรีย์วัตถุยังสามารถทำให้การอุ้มน้ำของดินดีขึ้น (Water Holding Capacity) โดยเฉพาะในดินทราย และยังช่วยเพิ่มการถ่ายเทอากาศและน้ำในดินอีกด้วย

5) สารคีเลต (Chelating Agent)

สารคีเลตมักเป็นสารประกอบอินทรีย์ (Organic Compound) โดยเป็น Chelate Metal Ion ที่สามารถรวมตัวกับโลหะแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน สารคีเลตที่มีการใช้ เช่น Ethylene diaminetetraacetic Acid (EDTA), Diethylene triaminepentaacetic Acid (DTPA), Citric Acid (CA) และ Ethylene diaminedisuccinic Acid (EDDS) เป็นต้น

ในประเทศญี่ปุ่นมีการกำจัดปริมาณแคดเมียมในดินโดยการทำ Treatment ซ้ำหลายๆ ครั้งด้วยการใช้สารละลาย EDTA และปูนขาว (Lime) ผลที่ได้คือ ปริมาณแคดเมียมที่บริเวณผิวดินลดลงจาก 27.9 เป็น 14.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Kobabayashi, Morii และ Muramoto, 1974)

Turgut, Katie และ Teresa (2004) ได้ทำการศึกษาผลของ EDTA และ Citric acid (CA) ในการบำบัด แคดเมียม โครเมียม และนิกเกิล จากดิน โดยการใช้ทานตะวัน พบว่า ที่ความเข้มข้นของ CA 1.0 กรัมต่อกิโลกรัม ทานตะวันมีการดูดดึงโลหะทั้งหมดได้สูงสุด 0.65 มิลลิกรัม ซึ่งถ้าความเข้มข้นของ CA มากกว่านี้จะทำให้เป็นพิษกับพืช (Phytotoxicity) สำหรับ EDTA พบว่า ที่ความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อกิโลกรัม ให้ผลการดูดดึงโลหะทั้งหมดเท่ากับ 0.73 มิลลิกรัม ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ดีกว่าความเข้มข้น 0.3 กรัมต่อกิโลกรัม ที่ให้ผลเพียง 0.40 มิลลิกรัม

ชิดชนก อัศวโภคี (2550) ได้ทำการศึกษาผลของตัวคีเลตต่อการสะสมแคดเมียมของทานตะวัน (*Helianthus annuus* Linn.) โดยเติมสารละลายแคดเมียมไนเตรต ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากการปลูกพืชเป็นเวลา 35 วัน ทำการเติมคีเลต 3 ชนิด คือ EDTA EDDS และ CA ผลการศึกษาพบว่า การเติม EDTA ที่ความเข้มข้น 0.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จำนวน 1 ครั้ง มีผลทำให้มีการสะสมแคดเมียมทั้งต้นมากที่สุดคือ 25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

(น้ำหนักแห้ง) และพบว่า EDTA มีการสลายตัวได้ช้ากว่า EDDS และ CA จึงสามารถปลดปล่อยแคดเมียมให้อยู่ในสารละลายได้มากกว่า EDDS และ CA

6) ชนิดของพืช

ลักษณะของพืชมีส่วนสำคัญในการกำหนดปริมาณโลหะหนัก ที่พืชจะดูดดึงจุลธาตุ และสะสมในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.7 เช่น กระเทียมมีการเคลื่อนย้ายแคดเมียมไปที่หัวและยอดเพียงเล็กน้อย ในเนื้อเยื่อของกระเทียมมีความเข้มข้นของแคดเมียมในปริมาณต่ำ แต่พบในรากมีปริมาณแคดเมียมเพิ่มขึ้น (Jiang, Liu และ Hou, 2001)

ตารางที่ 2.7 ปริมาณแคดเมียมในพืชชนิดต่างๆ ที่ปลูกในดินชนิดเดียวกัน

ชนิดพืช	ปริมาณแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง)
ส่วนใบของคื่นฉ่าย	28.80
มันฝรั่ง	1.76
ข้าวบาร์เลย์, ข้าวโพด	0.64
ใบยาสูบ	56.60

ที่มา: Schlipkoter and Brockhaus (1988) อ้างถึงใน ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (2545)

สำหรับพืชที่จัดว่าเป็น Hyperaccumulator ควรมีความสามารถในการสะสมจุลธาตุในใบและพืชสามารถเจริญเติบโตได้ ดังนี้ (Kabata-Pendias และ Pendias, 2000: 74)

>100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใน แคดเมียม
>1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใน โคบอลต์ ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว
>10,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใน แมงกานีส สังกะสี

พืชชนิดหนึ่งคือ *Thlaspi caerulescens* (Alpine Pennycress) เป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักไว้ในปริมาณมาก (Hyperaccumulator) สามารถผลิตชีวมวลได้ในช่วง pH 5.1-7.6 มากกว่าที่ pH 4.4 ซึ่งพบปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมสูงสุดในพืชคือ 236 มิลลิกรัมต่อ

กิโลกรัม (Yanai และคณะ, 2006) นอกจากนี้ ยังสามารถสะสมสังกะสีและตะกั่วในปริมาณที่สูง คิดเป็น 3% และ 0.8% ตามลำดับ (Alloway, 1995a)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

องนงนาฏ ศรีประโยชน์ (2549) ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของแคดเมียมในดินที่มีการปนเปื้อน โดยศึกษาการกระจายตัวและส่วนประกอบทางเคมีของแคดเมียมในดินที่มีการปนเปื้อนในพื้นที่บ้านพะเด๊ะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก พบว่า ดินในพื้นที่ศึกษาเป็นดินร่วนเหนียวปนทรายตลอดความลึกดิน มีเฉพาะดินที่ลุ่มที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร เท่านั้น ที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียว ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในดินมีค่าตั้งแต่ 5.39-8.22 และคงที่ตลอดความลึก อินทรียวัตถุมีอยู่ระหว่างร้อยละ 1.5-4.9 และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกมีค่าอยู่ระหว่าง 9.7-20 เซนติโมลต่อกิโลกรัม โดยมีปริมาณลดลงตามความลึกทั้งอินทรียวัตถุและความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ในการเก็บตัวอย่างแบ่งออกเป็น 4 พื้นที่ คือ พื้นที่ลุ่ม พื้นที่ดอนน้ำขัง พื้นที่ดอน และพื้นที่ป่า พบว่า มีปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในดินเท่ากับ 27 และ 23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในพื้นที่ลุ่มและพื้นที่ดอนน้ำขัง ตามลำดับ ส่วนพื้นที่ดอน พื้นที่ป่า มีปริมาณแคดเมียมอยู่ระหว่าง 0.34-2.59 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีมีปริมาณลดลงตามความลึกในทุกพื้นที่

Barzegar และ Koochekzadeh (2002) ทำการศึกษาการสะสมแคดเมียมและนิกเกิลในอ้อย ที่ปลูกบนพื้นที่ทิ้งล้างไว้เป็นระยะเวลา 36, 20 และ 2 ปี พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ที่ถูกทิ้งล้างไว้ 36 ปี มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ จากพื้นที่ที่ถูกทิ้งล้างไว้ 20 และ 2 ปี นอกจากนี้ยังพบว่า การสะสมของแคดเมียมและนิกเกิลโดยส่วนใหญ่อยู่ในชานอ้อย (Bagasses) และไม่สามารถหาค่าแคดเมียม และนิกเกิลในน้ำตาลทรายขาว (White Sugar) ได้

Rayment, Jeffrey และ Barry (2002) ทำการศึกษาโลหะหนักในต้นอ้อยที่ปลูกในประเทศออสเตรเลีย เป็นระยะเวลา 1 รอบอายุของอ้อย ซึ่งผลจากการสำรวจปริมาณโลหะหนักในดินของพื้นที่ปลูกอ้อย พบว่า มีปริมาณแคดเมียม, ทองแดง, ปรอท, ตะกั่ว และสังกะสีในดินทั้งหมดอยู่ในระดับ 0.05-0.11, <8-123, 0.02-0.20, 5-24 และ <12-193 มิลลิกรัม โลหะหนักต่อกิโลกรัมดิน

ตามลำดับ โดยอ้อยทั้งต้นมีปริมาณการสะสมโลหะหนักเท่ากับ 0.0054, 0.39, 0.0062, 0.02 และ 1.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (น้ำหนักสด) ตามลำดับ

Lu และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาการใช้ผักตบชวากำจัดแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ทั้งแคดเมียมและสังกะสี โดยผักตบชวาสามารถกำจัดโลหะหนักได้ ตั้งแต่สี่วันแรกของการทดลอง และพบว่า ผักตบชวามีการสะสมแคดเมียมไว้ในส่วนที่เป็นรากมากกว่าส่วนยอดของต้นเช่นเดียวกับสังกะสี จึงสามารถกล่าวได้ว่า พืชที่ปลูกในพื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetland Plants) มีความสามารถในการบำบัดความเป็นพิษของโลหะหนักได้

Michael, Daghan และ Schaeffer (2004) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกรดฮิวมิก โดยใช้เป็นสารคีเลตในกระบวนการ Phytoextraction จากดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม และมีการทดลองกับต้นยาสูบ (*Nicotiana tabacum* SR-1) ด้วยการเติมสารคีเลตลงไปในดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมในปริมาณต่างๆ กัน พบว่า กรดฮิวมิกที่เติมในอัตรา 2 กรัมต่อกิโลกรัมดิน สามารถเพิ่มความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน จากรากของยาสูบ 30.9 เพิ่มเป็น 39.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ยังพบว่า สารคีเลตมีผลทำให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ลดลง จึงมีผลทำให้แคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้ (Bioavailability) มีสูงขึ้น

นอกจากนี้ การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนระดับความเข้มข้นของแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี ในดินที่มีการปล่อยให้ทิ้งล้างจากการปลูกอ้อยเป็นระยะเวลา 36, 20, 2 และ 1 ปี ของ Barzegar และคณะ (2005) พบว่า มีปริมาณแคดเมียมสูงสุดที่สะสมอยู่ในดินเท่ากับ 0.16, 0.13, 0.25 และ 0.38 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังนั้น เมื่อมีการปล่อยพื้นที่ทิ้งไว้เป็นระยะเวลานาน ทำให้สามารถลดปริมาณแคดเมียมในดินลงได้ การศึกษานี้ยังพบว่า ปริมาณแคดเมียมในดินที่มีการปล่อยทิ้งล้างจากการปลูกอ้อย มีระดับต่ำกว่าดินที่ไม่มีการปลูกอ้อยแต่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเป็นเวลา 1 ปี อย่างไรก็ตาม ผลจากการศึกษานี้ยังพบว่า แคดเมียมมีการสะสมอยู่ในอ้อยทั้งต้นมีค่าเท่ากับ 15.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ ในชานอ้อยมีค่าเท่ากับ 0.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หากแต่ในกากน้ำตาล และน้ำตาลทรายขาวมีปริมาณแคดเมียมน้อยมากจนไม่สามารถหาค่าได้

Segura และคณะ (2006) ทำการศึกษาโลหะหนักในตัวอย่างอ้อยที่ปลูกในพื้นที่มีการฝังกลบขยะ และระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาลในประเทศบราซิล โดยศึกษาในส่วนราก ลำต้น และใบของอ้อย พบว่า รากอ้อยมีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียม, โครเมียม, ทองแดง, ปรอท,

แมงกานีส, ตะกั่ว และสังกะสี มีค่าเท่ากับ 0.23, 64.3, 140.6, 0.030, 561.6, 7.95 และ 177.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่า ปริมาณการสะสมโลหะหนักในลำต้นมีมากที่สุด คิดเป็น 80-90 เปอร์เซ็นต์ของส่วนที่พบในรากอ้อย ในขณะที่ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ตรวจพบในใบอ้อย พบว่า มีปริมาณการสะสมโลหะหนักอยู่ในปริมาณต่ำกว่าในรากอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ บริเวณที่มีการฝังกลบขยะชุมชน และบริเวณที่มีการบำบัดน้ำเสียจากโรงพยาบาล อาจมีผลทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักในดินเพิ่มสูงขึ้น และสามารถเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของอ้อยที่ปลูกในบริเวณดังกล่าวได้ ซึ่งจากผลการศึกษานี้ สามารถสรุปได้ว่าอ้อยสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดของพืชไร่ ที่สามารถสะสม และเจริญเติบโตในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินได้

นอกจากนี้ Liu และคณะ (2007) ทำการศึกษาการดูดดึง และการเคลื่อนย้ายของแคดเมียมในข้าว 6 สายพันธุ์ พบว่า ส่วนของข้าวเพียงเล็กน้อย (0.73 เปอร์เซ็นต์) ก็สามารถดูดดึงแคดเมียมได้ นอกจากนี้ การเคลื่อนย้ายแคดเมียมในดิน พบว่า รากข้าวสามารถดูดดึงแคดเมียมและเคลื่อนย้ายไปยังยอด และส่งต่อไปยังเมล็ด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แคดเมียมมีการกระจายตัวหรือเคลื่อนที่ไปยังส่วนอื่นๆ ของพืชที่อยู่เหนือดินได้

Murakami, Ae และ Ishikawa (2007) ทำการศึกษาการสะสมแคดเมียมโดยใช้พืช 3 ชนิด คือ ข้าว ถั่วเหลือง และข้าวโพด ซึ่งทำการทดลองในเรือนเพาะชำ โดยใช้ดินนาที่มีระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมเท่ากับ 0.83-4.29 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัม เป็นระยะเวลา 60 วัน ผลจากการศึกษาครั้งนี้พบว่า พืชทั้ง 3 ชนิดมีการดูดดึงแคดเมียมไว้ที่รากมากกว่าส่วนยอด โดยข้าวมีการดูดดึงแคดเมียมมากกว่าถั่ว และข้าวโพด มีค่าเท่ากับ 187, 116 และ 19 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

Tanhan และคณะ (2007) ได้ศึกษาการใช้สาบเสือในการดูดดึงและสะสมของแคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี โดยทดลองแบบไฮโดรโพนิค และในดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว พบว่า การทดลองแบบไฮโดรโพนิคที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในส่วนยอด และรากมีค่าเท่ากับ 1,772.3 และ 60,655.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ขณะที่มีการสะสมแคดเมียมเท่ากับ 102.3 และ 1,440.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และสังกะสีมีค่าเท่ากับ 1,876.0 และ 7,011.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับในดิน สาบเสือสามารถสะสมตะกั่วได้ 1,377 และ 4,236 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ส่วนยอดและราก ตามลำดับ แต่พบความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสีในดินอยู่ในปริมาณต่ำ จากผลการทดลองนี้เป็นการยืนยันว่า สาบเสือเป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมตะกั่วได้สูง (Hyperaccumulator) มีศักยภาพในการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1) พันธุ์อ้อยที่ใช้คือ พันธุ์ลูกผสม LK 92-11 จากจังหวัดกำแพงเพชร
2) ดินทดลองที่นำมาศึกษาในเรือนทดลองเป็นดินบน (Top Soil) ที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร จากพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลดงพระราม อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี
3) ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-8
4) ภาชนะปลูกเป็นถุงดำอย่างหนาเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 เซนติเมตร และห่อหุ้มด้วยพลาสติกอย่างหนา
5) กระดาษกรอง เบอร์ 40 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร (Whatman, England)
6) กระกาษกรอง GF/C (Glass Micro Filters) เส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร (Whatman, England)
7) น้ำปราศจากไอออน
8) พาราฟิล์ม
9) เครื่องแก้วชนิดต่างๆ ได้แก่ บีกเกอร์ กระบอกตวง ปิเปต กรวยกรอง แท่งแก้ว ขวดปรับปริมาตร กระจกนาฬิกา ขวดรูปชมพู่
10) ชุด Flask Buchner Filtration
11) ตะแกรงร่อนดินขนาด 2 มิลลิเมตร และ 0.75 มิลลิเมตร
12) อุปกรณ์สำหรับการปลูกอ้อย เช่น จอบ พลั่ว บัวรดน้ำ ถังน้ำ ค้อนทุบดิน เป็นต้น
13) ขวดพลาสติก สำหรับใส่สารละลายสกัดขนาด 60 มิลลิลิตร
14) ถุงซิป

3.1.2 เครื่องมือ

เครื่องมือ	รุ่น, ยี่ห้อ
เครื่องอะตอมมิคแอปซอร์บชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)	AAnalyst 800, Perkin Elmer
เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion)	ETHOS SEL, MILESTONE
ตู้อบความร้อน (Hot Air Oven)	ULE 500, MEMMERT
เตาไฟฟ้า (Hot Plate)	Cimarec 2, Thermolyne
เครื่องวัดความเป็นกรดเป็นด่าง (pH Meter)	Sension 2, HACH
เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง พิกัด 220 กรัม	BP 221S, Sartorius
เครื่องชั่งหยาบ 1 ตำแหน่ง	SBA61, SCALTEC
ปั้มดูดอากาศ	N035AN.18-IP20,
เครื่องเขย่าแบบหมุนวน (Mechanical Shaker)	OS-2, Green SSeriker2
เครื่องบดตัวอย่างพืช (Blender)	RT04A, Korea
เครื่องระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก (Global Positioning System; GPS)	Map76, Garmin
ตู้ดูดอากาศ (Hood)	Wiwatsan

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.3 สารเคมี

สารเคมี	บริษัทผู้ผลิต, ประเทศ
กรดไนตริกเข้มข้น (65% HNO_3)	MERCK, Germany
กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (37% HCl)	MERCK, Germany
กรดซัลฟูริกเข้มข้น (95-97% H_2SO_4)	MERCK, Germany
กรดเปอร์คลอริก (70% $HClO_4$)	Panreac, European Union
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% H_2O_2)	MERCK, Germany
แคดเมียมไนเตรท ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$)	Unilab, Australia
กรดไดเอทิลลีนไตรเอมีนเพนตะอะซีติก; DTPA ($C_{14}H_{23}N_3O_{10}$)	Fluka, Switzerland
ไตรเอทาโนลามีน (TEA) ($N(CH_2CH_2OH)$)	Unilab, Australia
แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรท ($CaCl_2.2H_2O$)	Univar, Australia

3.2 สถานที่ดำเนินการวิจัย

3.2.1 พื้นที่ปลูกอ้อยทดลอง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก จำนวน 3 แปลง โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.1 และตำแหน่งของจุดเก็บตัวอย่างดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1

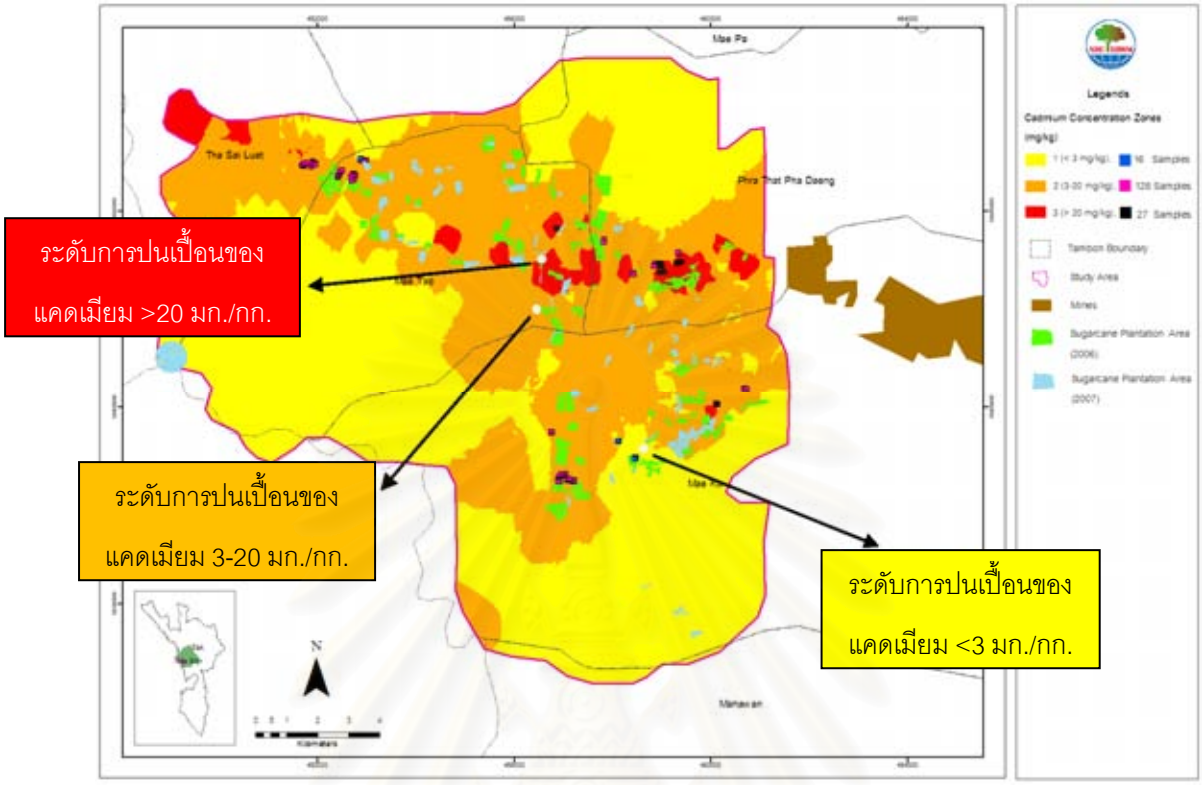
3.2.2 เรือนทดลอง ได้ทำการวิจัยที่ตำบลบ้านพระ อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี

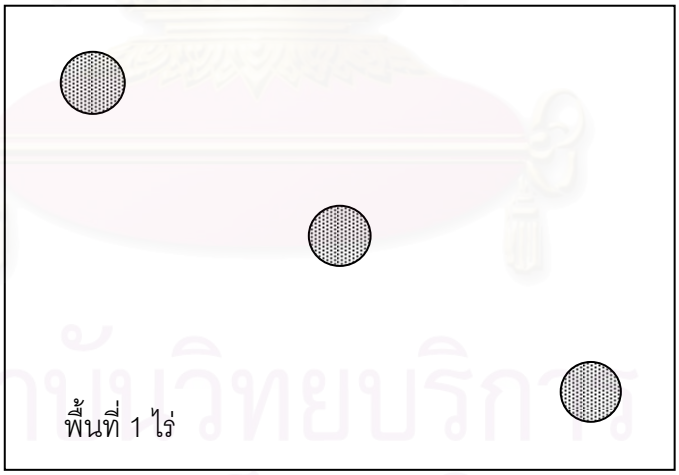
3.2.3 ห้องปฏิบัติการ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.4 ห้องปฏิบัติการ ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 พื้นที่ปลูกอ้อยที่ระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมต่างกัน

ที่ตั้ง	ระดับการปนเปื้อน แคดเมียม (มก./กก.)	วันที่ปลูก
บ้านแม่กุน้อย ตำบลแม่กุ	<3	12 ธันวาคม 2549
บ้านแม่ตาวแพะ ตำบลแม่ตาว	3-20	20 ธันวาคม 2549
บ้านแม่ตาวแพะ ตำบลแม่ตาว	>20	6 ธันวาคม 2549





รูปที่ 3.1 แผนที่ และตำแหน่งของจุดเก็บตัวอย่างดิน และอ้อยในพื้นที่จริงของอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

3.3 ระยะเวลาการวิจัย

เริ่มดำเนินการวิจัยในระหว่างเดือนตุลาคม 2549 ถึง มีนาคม 2551 ตั้งแต่การค้นคว้าหาข้อมูล การทบทวนเอกสาร การวางแผนการวิจัย การเก็บตัวอย่าง การวิเคราะห์ผล วิจารณ์ และสรุปผลการวิจัย โดยการศึกษาวิจัยในพื้นที่จริง และเรือนทดลอง สามารถแสดงรายละเอียดของวันที่ทำการเก็บตัวอย่าง และขั้นตอนของการศึกษาได้ดังตารางที่ 3.2 และ 3.3

ตารางที่ 3.2 วันที่เก็บตัวอย่างดินและพืชในการศึกษาพื้นที่จริง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

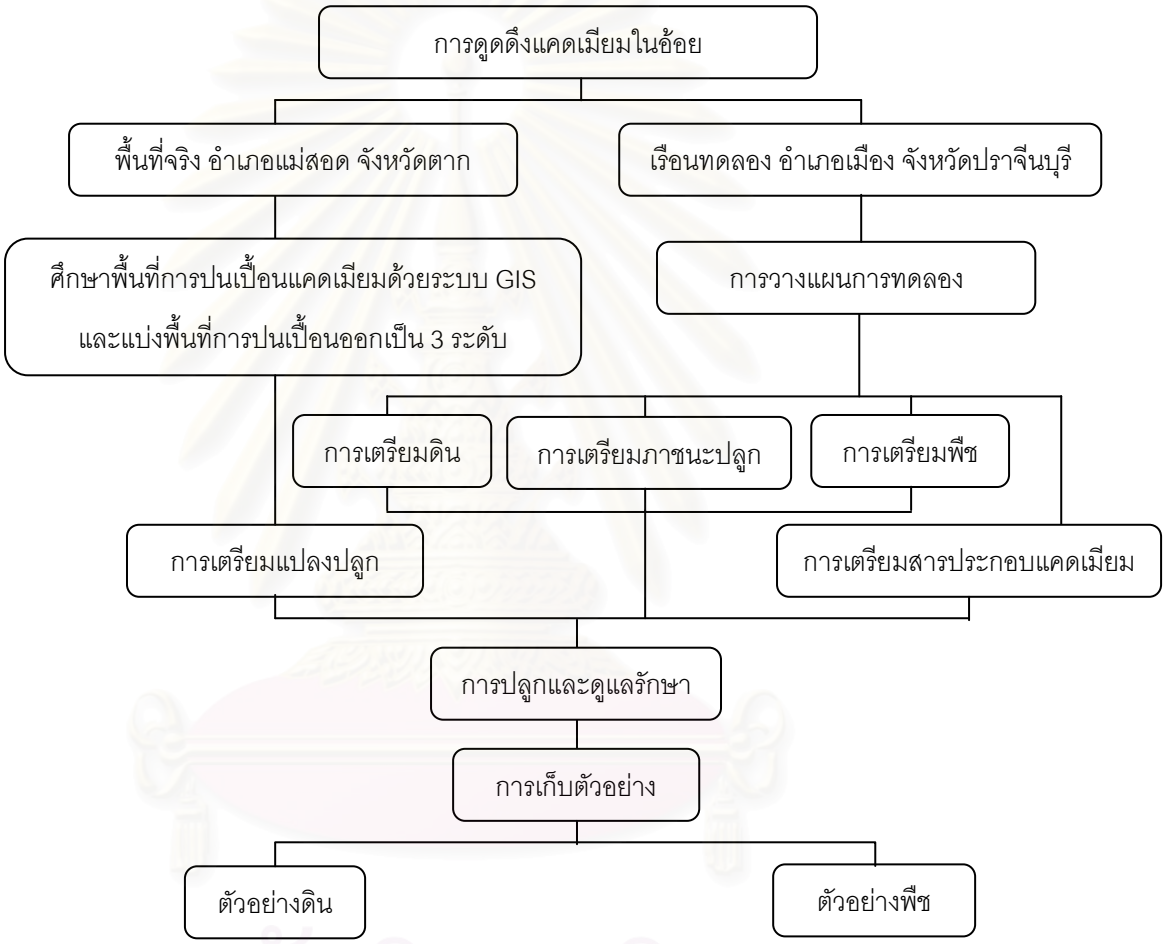
ขั้นตอนการศึกษา	วันที่
เก็บดินตัวอย่างมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติเบื้องต้น	3 ธันวาคม 2550
เก็บตัวอย่างดินและอ้อยครั้งที่ 1	13 มีนาคม 2550
เก็บตัวอย่างดินและอ้อยครั้งที่ 2	11 กรกฎาคม 2550
เก็บตัวอย่างดินและอ้อยครั้งที่ 3	17 ตุลาคม 2550

ตารางที่ 3.3 วันที่ทำการทดลอง และเก็บตัวอย่างในเรือนทดลอง อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี

ขั้นตอนการศึกษา	วันที่
เก็บดินตัวอย่างมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติเบื้องต้น	25 มกราคม 2550
วันปลูกอ้อย	30 มกราคม 2550
ใส่สารประกอบแคดเมียม	1 เมษายน 2550
เก็บตัวอย่างดินและอ้อยครั้งที่ 1	30 มิถุนายน 2550
เก็บตัวอย่างดินและอ้อยครั้งที่ 2	28 กันยายน 2550
เก็บตัวอย่างดินและอ้อยครั้งที่ 3	27 ธันวาคม 2550

3.4 การดำเนินการวิจัย

ได้สรุปขั้นตอนการดำเนินการวิจัยในภาพรวมของงานทั้งหมด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.1 การศึกษาการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินของอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

1) การศึกษาพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมด้วยข้อมูลจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) แสดงรายละเอียดได้ในตารางที่ 3.4

ดินที่นำมาศึกษาเป็นดินบนของพื้นที่ โดยทำการเก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มทั้งพื้นที่ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร จำนวนทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยแบ่งตัวอย่างดินออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) นำตัวอย่างดินมาผึ่งลม (Air Dry) ให้แห้ง บด และร่อนผ่านตะแกรง 10 Mesh หรือ 2 มิลลิเมตร เพื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวอย่างดิน (Soil Properties) โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.5 และ 2) นำตัวอย่างดินมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง บด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อทำการวิเคราะห์โลหะหนัก

ตารางที่ 3.4 ค่าพิกัดตำแหน่งของจุดเก็บตัวอย่างในพื้นที่

ระดับการปนเปื้อนแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	พื้นที่ (ไร่)	แปลง	พิกัด X	พิกัด Y
<3	5	1	458625	1839156
		2	458642	1839156
		3	458655	1839156
3-20	22	1	456460	1842030
		2	456444	1842035
		3	456423	1842038
>20	5	1	456550	1843022
		2	456558	1843019
		3	456571	1843018

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์ดินที่นำมาศึกษา

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง	pH Meter (ดิน:น้ำ = 1:1)
อินทรียวัตถุ	Walkley and Black Method
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	Ammonium Saturation and Distillation
ความชื้นในดิน	Gravimetric Method
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	Kjeldahl Method
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด	Colorimetric Method
โพแทสเซียม	Ammonia Acetate 1N pH 7.0 Extraction
ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด	Microwave Digestion และ AAS
ลักษณะเนื้อดิน	Hydrometer Method

2) การเตรียมแปลงปลูก

เริ่มด้วยการไถดะ ไถแปร และชักร่องหรือเตรียมดินให้ลึก เพื่อทำลายดินดาน และให้มีความชื้นพอเหมาะ มีการระบายน้ำและอากาศที่ดี การคัดเลือกลำอ้อยที่ใช้สำหรับปลูกให้มีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกัน ท่อนพันธุ์ต้องสมบูรณ์ ได้จากแปลงขยายพันธุ์มีอายุประมาณ 6-8 เดือน

3) การปลูกและดูแลรักษา

นำท่อนพันธุ์อ้อยที่ไม่มีโลหะหนักปนเปื้อน และผ่านการคัดเลือกแล้ว วางลงในร่องแปลงปลูกในพื้นที่ที่ต้องการศึกษาทั้ง 3 ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม ดูแลรักษา รดน้ำท่อนพันธุ์ โดยควบคุมปริมาณน้ำในพื้นที่ศึกษาเท่าๆ กัน ในระหว่างการปลูกอ้อยมีการใส่ปุ๋ยสูตร 16-16-8 จำนวน 2 ครั้ง คือ ครั้งแรกใส่ปุ๋ยตอนเริ่มปลูก (ปุ๋ยรองพื้น) ในอัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ และครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยหลังจากการให้ปุ๋ยครั้งแรกแล้ว 3 เดือน (ปุ๋ยแต่งหน้า) ในอัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่เช่นกัน

4) การเก็บตัวอย่าง

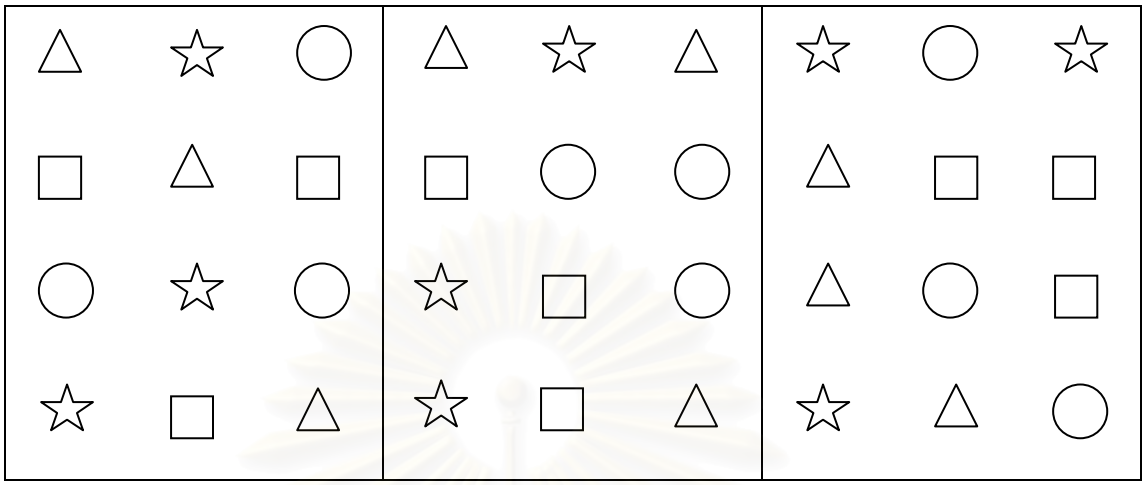
4.1) การเก็บตัวอย่างอ้อย ทำการเก็บตัวอย่างอ้อยทุก 3, 6 และ 9 เดือน ทั้งหมด 3 ครั้ง โดยนำอ้อยมาล้างน้ำให้สะอาดแล้วแยกออกเป็นส่วนต่างๆ ได้แก่ ราก ท่อนพันธุ์เดิม ใบ และลำต้น โดยส่วนของลำต้นนำมาคั้นน้ำได้เป็นซานอ้อย แล้วนำส่วนต่างๆ มาชั่งน้ำหนักสด นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ หลังจากนั้น นำไปชั่งน้ำหนักแห้ง บดให้ละเอียด เก็บไว้ในถุงซิป เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง

4.2) การเก็บตัวอย่างดิน ทำการเก็บตัวอย่างดินทุก 3, 6 และ 9 เดือน โดยเก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร ในบริเวณเดียวกันกับการเก็บตัวอย่างอ้อย นำดินบางส่วนไปวัดหาค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ตัวอย่างดินส่วนที่เหลือนำมาผึ่งลม (Air Dry) และแบ่งดินบางส่วนไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักแห้ง บด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 Mesh หรือ 0.75 มิลลิเมตร เก็บไว้ในถุงซิป เพื่อทำการหาปริมาณแคดเมียมที่สะสมในดิน ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง

4.3.2 การศึกษาการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อยที่ปลูกในเรือนทดลอง อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี

1) การวางแผนการทดลอง (Experimental Design)

แผนการทดลองคือ Factorial in Randomized Complete Block Design (RCBD) (ดังรูปที่ 3.3) ประกอบด้วย 2 ปัจจัย ซึ่งปัจจัยที่ 1 คือ อายุของการเก็บตัวอย่างอ้อย 3 ครั้ง ได้แก่ 3, 6 และ 9 เดือน ปัจจัยที่ 2 คือ ระดับความเข้มข้นของสารประกอบแคดเมียมไนเตรท 4 ระดับ ได้แก่ ควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน โดยทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ



รูปที่ 3.3 การวางแผนทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD)

หมายเหตุ △ แทน ความเข้มข้นของแคดเมียมควบคุม
☆ แทน ความเข้มข้นของแคดเมียม 10 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน
○ แทน ความเข้มข้นของแคดเมียม 20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน
□ แทน ความเข้มข้นของแคดเมียม 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน

2) การเตรียมดิน

การเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่เกษตรกรรม โดยวิธีการแบบสุ่ม ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร เป็นตัวอย่างรวม ผึ่งลมให้แห้ง จำนวน 1,800 กิโลกรัม (50 กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) ต่อ 1 ภาชนะปลูก) จำนวน 36 ถุง และทำการสุ่มดินตัวอย่างมาวิเคราะห์คุณสมบัติของดิน ตามพารามิเตอร์ต่างๆ ดังสรุปไว้ในตารางที่ 3.5

3) การเตรียมภาชนะปลูก

ใช้ถุงพลาสติกสีดำอย่างหนาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ชั่งดินน้ำหนัก 50 กิโลกรัม ใส่ในภาชนะปลูก จำนวนทั้งหมด 36 ภาชนะปลูก แล้วหุ้มด้วยถุงพลาสติกอย่างหนาเพื่อรองรับโลหะหนักที่ออกมากับน้ำที่ใช้รดต้นไม้

4) การเตรียมพืชทดลอง

โดยการสุ่มตัวอย่างลำอ้อยจำนวน 3 ลำ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมสะสม โดยการย่อยด้วยกรดไนตริก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตามวิธีการของ United States Environmental Protection Agency (USEPA) Method 3052 (USEPA, 1996) แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิคแอปซอร์บชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS) ซึ่งพบว่า เครื่องไม่สามารถวัดค่าได้ (Not Detectable) แสดงให้เห็นว่า ท่อนพันธุ์ที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ ไม่มีการปนเปื้อนหรือการสะสมใดๆ ของแคดเมียมแต่อย่างใด จากนั้นคัดเลือกลำอ้อยที่ใช้สำหรับปลูกให้มีขนาด และน้ำหนักใกล้เคียงกัน ท่อนพันธุ์ที่ใช้ปลูกแต่ละท่อนมีตา 2-3 ตา และตาควรมีลักษณะเต่ง สมบูรณ์ และตาไม่บอด

5) การเตรียมสารประกอบแคดเมียม

ชั่งน้ำหนักสารประกอบแคดเมียมไนเตรท ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) ให้ได้ตามสัดส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน โดยคำนวณจากน้ำหนักดิน 50 กิโลกรัมต่อภาชนะปลูก (น้ำหนักแห้ง) ดังตารางที่ 3.6 และทำการละลายสารประกอบแคดเมียมไนเตรทในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วเทลงในภาชนะปลูกจำนวน 9 ภาชนะปลูกต่อระดับความเข้มข้น (ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ) โดยใส่หลังจากที่อ้อยมีอายุประมาณ 2 เดือน เพื่อให้แน่ใจว่าอ้อยมีอัตราการรอด 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 3.6 ปริมาณสารประกอบแคดเมียมไนเตรท ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) ที่ใส่ลงไปในดิน

ความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณสารประกอบแคดเมียมไนเตรท ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) (กรัมต่อภาชนะปลูก)
10	1.3721
20	2.7442
40	5.4884

หมายเหตุ: มวลโมเลกุลของแคดเมียม เท่ากับ 112.411

มวลโมเลกุลของสารประกอบแคดเมียมไนเตรท เท่ากับ 308.479

(ภาคผนวก ก)

6) การปลูกอ้อย

นำท่อนพันธุ์อ้อยที่คัดเลือกแล้ว ปักชำหรือปลูกโดยวางลงในภาชนะที่ใส่ดินเตรียมไว้ จำนวน 2 ท่อนพันธุ์ รดน้ำ และดูแลรักษา จนกว่าตาอ้อยเริ่มงอก และเจริญเติบโตเป็นต้น ประมาณ 2 เดือน เด็ดตาที่ไม่สมบูรณ์ทิ้งให้เหลือต้นที่มีความสมบูรณ์ 2 ต้นต่อภาชนะปลูก โดยมีขนาดของต้นใกล้เคียงกันทุกภาชนะปลูก

7) การดูแลรักษา

รดน้ำท่อนพันธุ์อ้อย โดยควบคุมปริมาณน้ำ 1 ลิตรต่อครั้งต่อภาชนะปลูก ในระหว่างการปลูกอ้อยใส่ปุ๋ยสูตร 16-16-8 จำนวน 8 กรัมต่อครั้ง (อัตราการใส่ปุ๋ย 50 กิโลกรัมต่อไร่, ภาคผนวก ก) จำนวน 2 ครั้ง คือ ครั้งแรกใส่ปุ๋ยตอนที่เริ่มปลูก และครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยภายหลังจากการให้ปุ๋ยครั้งแรกแล้ว 3 เดือน

8) การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างอ้อย และตัวอย่างดิน โดยได้ทำการเก็บตัวอย่างทุก 3, 6 และ 9 เดือน (หลังจากที่มีการใส่สารประกอบแคดเมียม) ทั้งหมด 3 ครั้ง ซึ่งการเก็บตัวอย่างได้ทำเช่นเดียวกับข้อ 4) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่สะสมในดิน และส่วนต่างๆ ของอ้อย ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5 การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม

3.5.1 การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในดิน ทำโดยนำตัวอย่างดินที่ผ่านการอบ และร่อนแล้ว ชั่งน้ำหนักจำนวน 0.5 กรัม แล้วนำมาย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น จำนวน 9 มิลลิลิตร กับกรดไนตริกเข้มข้น จำนวน 3 มิลลิลิตร ใช้ตามวิธีการของ USEPA method 3052 (USEPA, 1996) ด้วยเครื่องมือสำหรับย่อยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) โดยมีการตั้งโปรแกรมสำหรับการย่อยดินไว้ดังตารางที่ 3.7 ใช้เวลาในการย่อยทั้งหมด 25 นาที กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 40 แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ได้ 50 มิลลิลิตร เก็บไว้ในขวด นำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิคแอปซอร์บชั่นสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 3.7 เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการย่อยดินด้วยระบบไมโครเวฟ

ขั้นตอนที่	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	10	200
2	15	200

3.5.2 การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดิน

การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดิน ทำได้โดยนำตัวอย่างดินที่ผึ่งลมจนแห้ง มาบด และร่วนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร แล้วชั่งน้ำหนัก จำนวน 10 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ หลังจากนั้น เติมด้วยน้ำยาสกัด DTPA (ภาคผนวก ข) จำนวน 20 มิลลิลิตร ปิดขวดให้สนิทด้วยพาราฟิล์ม นำไปเข้าเครื่องเขย่าแบบหมุนวน โดยใช้ความเร็วเท่ากับ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C โดยใช้ปั๊มดูดอากาศช่วยในการกรอง

ไม่ต้องปรับปริมาตร เทสารละลายที่ได้จากการกรองลงในขวด เพื่อนำไปหาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิคแอปซอร์บชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (กรมวิชาการเกษตร, 2544: 72-75)

3.5.3 การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของพืช

การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย ทั้งหมด 4 ส่วน คือ ราก ท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย และใบ ทำการวิเคราะห์โดยใช้ตัวอย่างพืชที่ผ่านการบดละเอียดแล้ว ชั่งน้ำหนัก 0.5 กรัม ย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้นจำนวน 8 มิลลิลิตร กับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จำนวน 2 มิลลิลิตร โดยใช้เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) โปรแกรมที่ใช้สำหรับการย่อยพืชแสดงไว้ดังตารางที่ 3.8 ใช้ระยะเวลาในการย่อยทั้งหมด 30 นาที กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 40 แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ได้ 25 มิลลิลิตร เก็บไว้ในขวด นำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิคแอปซอร์บชั่นสเปกโตรมิเตอร์

ตารางที่ 3.8 เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการย่อยส่วนต่างๆ ของอ้อยด้วยระบบไมโครเวฟ

ขั้นตอนที่	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	3	85
2	9	145
3	4	200
4	14	200

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.4 การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในน้ำอ้อย

การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในน้ำอ้อย ใช้วิธีการย่อยด้วยเตาไฟฟ้า โดยใช้กรดเข้มข้นผสมรวมกัน 3 ชนิด (Ternary Mixture Acids Digestion) คือ กรดไนตริกเข้มข้น : กรดซัลฟูริกเข้มข้น : กรดเปอร์คลอริก ในอัตราส่วนเท่ากับ 10 : 1 : 4 (Jackson, 1973: 331-334) ตวงน้ำอ้อยปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ ตั้งบนเตาไฟฟ้าเพื่อไล่น้ำออก (ทำการทดลองในตู้ดูดอากาศ) จนมีปริมาตรประมาณ 25 มิลลิลิตร น้ำอ้อยเริ่มมีสีน้ำตาลเข้ม อันเกิดมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีคาราเมล (Caramelization) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลในน้ำอ้อยเมื่อได้รับความร้อนในสภาพที่ไม่มีน้ำหรือน้ำน้อย หลังจากนั้นยกลงจากเตาไฟฟ้าแล้วใส่กรดผสม (Mixed Acid) จำนวน 25 มิลลิลิตร ลงไปในบีกเกอร์ ค่อยๆ ใส่กรดลงไปย่อยกับน้ำอ้อย โดยปิดด้วยกระจกนาฬิกา น้ำอ้อยมีการทำปฏิกิริยากับกรดผสม ในระหว่างนั้นมีการเกิดปฏิกิริยาอย่างรุนแรง แล้วนำไปตั้งบนเตาไฟฟ้า เพื่อให้การย่อยสมบูรณ์ ย่อยจนกระทั่งได้น้ำอ้อยที่ใส หลังจากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 40 ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ได้ 25 มิลลิลิตร เก็บไว้ในขวด เพื่อนำไปวัดค่าปริมาณแคดเมียมในน้ำอ้อยด้วยเครื่องอะตอมมิคแอปซอร์บชั่นสเปกโตรมิเตอร์

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในดิน และปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อย (ภาคผนวก ค) ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ ANOVA เพื่อหาค่า F-value ของปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่พบในราก ท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย น้ำอ้อย และใบ โดยข้อมูลได้แสดงค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่ข้อมูลเกิดความแตกต่างกัน ได้ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูล ด้วยวิธีการของ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) และคำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Sciences)

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

4.1 คุณสมบัติและองค์ประกอบเบื้องต้นของดิน

ในการศึกษาการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้อ้อย ต้องทราบลักษณะสมบัติและองค์ประกอบของดินก่อน เนื่องจากดินที่นำมาศึกษานี้มาจากหลายพื้นที่ ทำให้สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ย่อมมีความแตกต่างกัน จึงได้ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของดิน ได้ผลดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 นอกจากนี้ การศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ในพื้นที่จริง อยู่ที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ของเกษตรกรผู้ปลูกอ้อย 3 ราย ที่มีระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมแตกต่างกัน ซึ่งดินดั้งเดิมของทั้ง 3 พื้นที่นี้ เดิมเคยเป็นดินนาปลูกข้าวมาก่อน แล้วจึงเปลี่ยนมาปลูกอ้อย 2) ในเรือนทดลอง เป็นดินจากพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลดงพระราม อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี เป็นดินที่เคยปลูกมันสำปะหลังมาก่อน

คุณสมบัติของดินจากพื้นที่จริงมีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วน (Loam Soils) ค่าความเป็นกรดเป็นด่างอยู่ในช่วง pH 6-7 มีสภาพเป็นกลางถึงกรดอ่อน ส่วนดินในเรือนทดลอง มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง เท่ากับ 4.87 ทำให้สภาพดินค่อนข้างเป็นกรด ดังจะเห็นได้ว่าลักษณะเนื้อดินค่อนข้างเป็นดินทรายนั้น มักมีความสามารถในการดูดจับโลหะหนักได้ดีกว่าดินที่เป็นดินเหนียว (Cottenies, Kiekans, และ Van Landschoot, 1984; Bell และคณะ, 2001) นอกจากนี้ ปริมาณความชื้นในดิน เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของอ้อย โดยอ้อยมีการใช้น้ำหรือความชื้นลำเลียงผ่านระบบรากขึ้นไปยังลำต้น ซึ่งตัวอย่างดินทดลองที่นำมาศึกษานี้ มีปริมาณความชื้นประมาณ 13-14 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาถึงค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity; CEC) ค่าอินทรียวัตถุ (Organic Matter; OM) และธาตุอาหารหลัก (Macronutrient Elements) ของพืช คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม พบว่า ดินในเรือนทดลองมีค่าดังกล่าวเท่ากับ 3.6 c mol $_{(+)}$ kg^{-1} 1.31 เปอร์เซ็นต์ 0.066 เปอร์เซ็นต์ 280 ppm และ 26 ppm ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่มีอยู่ในปริมาณน้อยกว่าดินในพื้นที่จริงทั้ง 3 พื้นที่ศึกษา ดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 จากการรายงานของ Adriano (2001: 295) พบว่า ดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุมาก และเนื้อดินที่มีความละเอียดสูง ทำให้มีค่า CEC สูงขึ้นด้วย ดังนั้น สามารถกล่าวได้ว่า พืชมี

ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมในดินที่มีค่า CEC สูง ได้มากกว่าดินที่มีค่า CEC ต่ำ

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของดินเบื้องต้น

พารามิเตอร์	ค่าการวิเคราะห์			
	ระดับการปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่จริง (มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน)			เรือนทดลอง
	<3	3-20	>20	
ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (n=3)	7.45±0.03	6.36±1.10	7.53±0.07	4.87±0.51
อินทรียวัตถุ (%)	1.48	1.31	2.52	1.31
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (c $mol_{(+)}$ kg^{-1})	6.6	13.3	7.8	3.6
ปริมาณความชื้น (%) (n=3)	13.27±1.96	14.11±0.66	14.24±1.96	13.08±1.43
ไนโตรเจนทั้งหมด (%)	0.074	0.066	0.126	0.066
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (ppm)	415	342	439	280
โพแทสเซียม (ppm)	63	80	78	26
แคดเมียมทั้งหมด (มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน) (n=3)	2.57±6.04	16.66±4.99	174.51±42.80	2.65±0.76
ทราย (%)	55.60	51.20	42.80	53.00
ทรายแป้ง (%)	25.00	22.80	31.00	11.00
ดินเหนียว (%)	19.40	26.00	26.20	36.00
เนื้อดิน	ดินร่วนปนทราย (Sandy Loam)	ดินร่วนเหนียวปนทราย (Sandy Clay Loam)	ดินร่วน (Loam)	ดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay)

การที่รากของพืชมีความสามารถในการสะสมหรือดูดดึงสารพิษที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน เข้าไปในส่วนต่างๆ ของพืชในปริมาณที่แตกต่างกันไปนั้น มีปัจจัยหลายอย่างที่เข้ามาเกี่ยวข้อง ทั้งปัจจัยทางด้านเคมีและกายภาพ ที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ (Mobility) และการนำไปใช้ของพืชหรือสิ่งมีชีวิต (Bioavailability) เช่น ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) เนื้อดิน (Texture) ความสามารถในการ

แลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential; (ORP) หรือ Redox Potential) อินทรียวัตถุ (OM) โลหะอื่นๆ (Other Metals) ความอุดมสมบูรณ์ของดิน (Fertilization) ปริมาณแคดเมียมในดิน ชนิดของแคดเมียม เป็นต้น และปัจจัยทางด้านพืช เช่น ชนิด และสายพันธุ์ของพืช เป็นต้น (Adriano, 2001: 281, 293)

สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่มีอยู่ในดินที่ทำการศึกษา พบว่า ดินจากพื้นที่จริง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ที่มีระดับการปนเปื้อนของแคดเมียม <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ข้อมูลจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) (NRC-EHWN, 2005) มีปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 2.57, 16.66 และ 174.51 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และดินในเรือนทดลอง อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี มีปริมาณแคดเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 2.65 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมที่กำหนดไว้ไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2547) นอกจากนี้ Zarcinas และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาโลหะหนักในดิน จากตัวอย่างดิน 318 ตัวอย่าง ที่ระดับความลึกของดิน 0-15 เซ็นติเมตร ทำการสุ่มตัวอย่างจากดินเกษตรกรรม ป่า และพื้นที่ที่ไม่ได้ทำการเกษตรกรรม ในภาคกลาง ภาคตะวันออก ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ของประเทศไทย โดยทำการวิเคราะห์ดินด้วยสารละลาย Aqua regia พบว่า มีระดับแคดเมียม สารหนู โครเมียม ทองแดง ปรอท นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี อยู่ในดินมีค่าเท่ากับ 0.15, 30, 80, 45, 0.10, 45, 55 และ 70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าพื้นที่โดยทั่วไปที่ไม่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก สามารถพบปริมาณแคดเมียมที่ปนเปื้อนอยู่ในดินได้เช่นกัน

4.2 การดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในพื้นที่จริงของอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

การศึกษาการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ศึกษาการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในพื้นที่จริงของอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และ 2) ศึกษาการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในเรือนทดลอง ได้ทำการวิจัยที่จังหวัดปราจีนบุรี (ภาคผนวก จ) เนื่องจากเป็นจังหวัดที่มีการปลูกอ้อยมากจังหวัดหนึ่งในภาคตะวันออก โดยมีพื้นที่ปลูกอ้อยในปี 2549 เท่ากับ 13,139 ไร่ (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2550) ดังนั้น การศึกษาในครั้งนี้ จึงเป็นการศึกษาเพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน โดยใช้อ้อยเป็นตัวกำจัดแคดเมียมออกจากดินที่มีการปนเปื้อน และมีการยืนยันผล

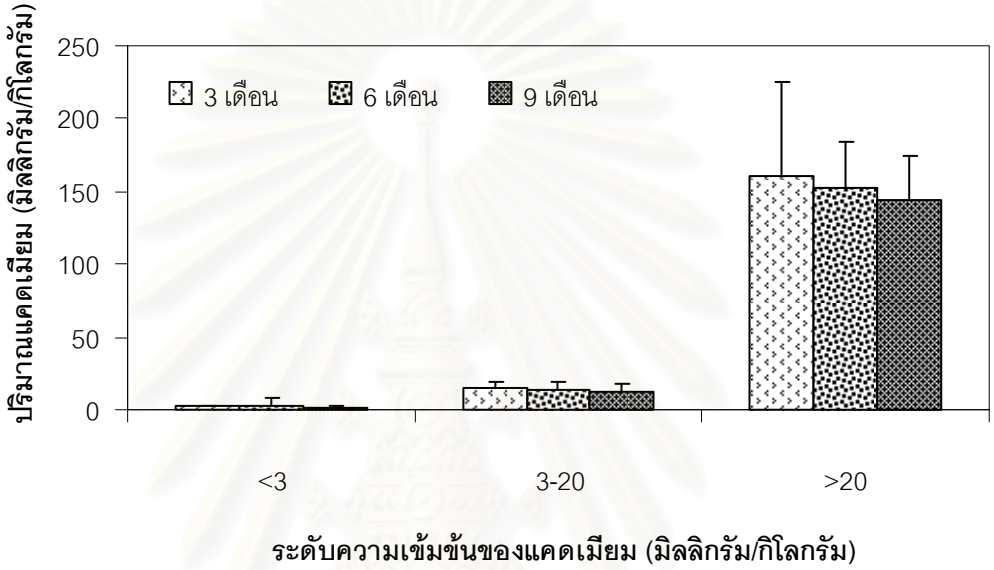
โดยการปลูกในเรือนทดลอง ที่มีการควบคุมปริมาณแคดเมียมตามระดับความเข้มข้นที่ต้องการ รวมถึงได้ทำการศึกษาถึงการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย เพื่อสามารถใช้เป็นแนวทางในการจัดการต่อไป โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

ในธรรมชาติของดินทั่วไป ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินมีมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของแคดเมียมที่อยู่ในหินต้นกำเนิด (Parent Rock) โดยทั่วไปดินสำหรับเกษตรกรรมมีระดับแคดเมียมอยู่ในดินประมาณ 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมหรือมีในระดับต่ำกว่านี้ (Adriano, 2001) ซึ่งพบว่า ในแต่ละพื้นที่หรือแต่ละประเทศ มีปริมาณแคดเมียมในดินดั้งเดิมแตกต่างกันไป ยกตัวอย่างเช่น บริเวณผิวดินสำหรับทำการเกษตรในเมืองออนตาริโอ (Ontario) ประเทศแคนาดา พบว่า มีระดับแคดเมียมในดินเฉลี่ยเท่ากับ 0.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (โดยพบอยู่ในช่วง 0.10-8.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) (Adriano, 2001: 270) อย่างไรก็ตาม การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการศึกษา ในบริเวณพื้นที่ศึกษา ซึ่งเดิมเป็นพื้นที่ปลูกข้าว และพบปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียมในดินที่มีการปลูกข้าวในปริมาณที่สูง ทำให้เมล็ดข้าวมีการสะสมแคดเมียมในปริมาณที่สูงเกินกว่ามาตรฐานอาหารระหว่างประเทศ ซึ่งได้กำหนดค่าการสะสมแคดเมียมไว้ไม่เกิน 0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Codex, 2005) ดังนั้น เกษตรกรในพื้นที่ดังกล่าวนั้น จึงได้รับการส่งเสริมให้ปรับเปลี่ยนจากการปลูกข้าวมาเป็นการปลูกอ้อยแทน เพื่อการผลิตเอทานอล หรือเป็นพลังงานทดแทนที่มีความสำคัญยิ่งต่อการพัฒนาประเทศในปัจจุบัน อีกทั้งการปลูกอ้อยยังให้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจที่สูง และคุ้มค่าไม่น้อยไปกว่าการปลูกข้าวตามวิธีการปฏิบัติเดิมของเกษตรกร ด้วยเหตุนี้เองจึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

งานวิจัยนี้ ได้มีการออกแบบ และวางแผนการศึกษาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดที่มีการปนเปื้อนในดิน โดยแบ่งตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ปริมาณการปนเปื้อนของแคดเมียมที่ระดับ <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ได้ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่ดังกล่าว เพื่อนำไปวิเคราะห์หรือตรวจหาคุณสมบัติดินเบื้องต้นตามค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ขั้นตอนต่อไปคือ เกษตรกรของทั้ง 3 พื้นที่ดังกล่าว ได้ทำการปลูกอ้อย และดูแลรักษา และเมื่ออ้อยมีอายุ 3, 6 และ 9 เดือน จึงได้ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มไปทำการวิเคราะห์ เพื่อหาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ พบว่า ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินทั้ง 3 ระดับความเข้มข้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ซึ่งผลจากการศึกษานี้ ทำให้ทราบถึงปริมาณ

แคดเมียมทั้งหมดที่ปนเปื้อนอยู่ในพื้นที่จริง มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อยนานขึ้น การที่ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินลดลงนี้ เนื่องจากในดินอาจแคดเมียมไอออนที่อยู่ในรูปของสารละลายดิน (Soil Solution) ทำให้พืชมีความสามารถดูดดึงแคดเมียมไอออน และเคลื่อนที่ไปสะสมยังส่วนต่างๆ ของอ้อยได้ จึงมีผลทำให้ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินลดลง



รูปที่ 4.1 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินจากพื้นที่จริง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

นอกจากนี้ พบว่า ทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 3, 6 และ 9 เดือน ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน ดังตารางที่ 4.2 โดยที่ระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมในดิน >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีความแตกต่างกับระดับความเข้มข้นของแคดเมียม <3 และ 3-20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร b)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินจากพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
<3	2.35^{a}±0.42	2.23^{a}±6.42	1.89^{a}±1.11
3-20	15.76^{a}±3.59	13.98^{a}±5.23	11.71^{a}±5.72
>20	161.08^{b}±64.65	153.12^{b}±30.27	144.61^{b}±30.34

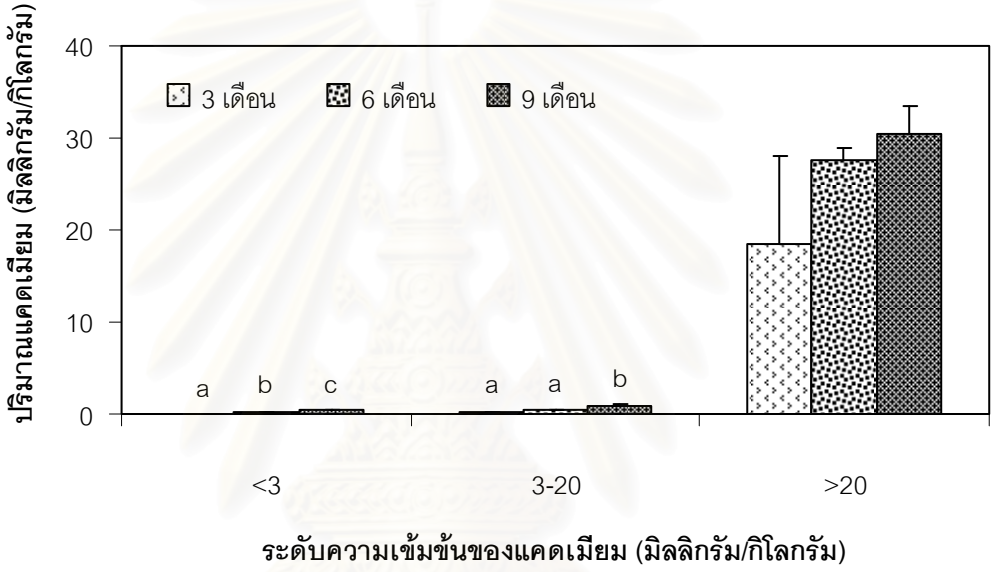
หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

4.2.2 แคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้

ในธรรมชาติของดินจะมีโลหะหนักสะสมอยู่ในดิน และตะกอนดินได้หลายรูปแบบ (Form หรือ Speciation) โดยรูปแบบที่มีความสนใจศึกษาคือ รูปแบบที่พืชและสิ่งมีชีวิตสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และสามารถสะสมได้ในสิ่งมีชีวิตหรือที่เรียกว่า Bioavailability ซึ่งโลหะหนักที่มี Bioavailability สูง อาจมีแนวโน้มที่สามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่ได้รับโลหะหนักนั้น มีการสะสมเข้าสู่ร่างกายมากกว่าโลหะหนักที่มี Bioavailability ต่ำ (Davis, Ruby และ Bergstorm, 1994) ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ โดยการสุ่มตัวอย่างดินในพื้นที่ทั้ง 3 ระดับความเข้มข้น ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน

จากผลการศึกษา ดังรูปที่ 4.2 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดินมีค่าเพิ่มขึ้นทั้ง 3 ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อน เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างต่อปริมาณแคดเมียมสะสม พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม <3 และ 3-20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ระดับความเข้มข้น <3 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัม มีความแตกต่างกันในทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (กลุ่มอักษร a, b และ c) และที่ระดับความเข้มข้น 3-20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน มีปริมาณแคดเมียมแตกต่างจากระยะเวลา 3 และ 6 เดือนอย่างมีนัยสำคัญ (กลุ่มอักษร a และ b)

สำหรับที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน มีปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้มากกว่าที่ระยะเวลา 3 และ 6 เดือน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.37, 0.82 และ 30.46 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน



รูปที่ 4.2 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดินในพื้นที่จริง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

เมื่อศึกษาถึงระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีความแตกต่างกับระดับความเข้มข้น <3 และ 3-20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน

ตารางที่ 4.3 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้จากดินในพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
<3	0.06^{a}±0.02	0.25^{a}±0.02	0.37^{a}±0.07
3-20	0.19^{a}±0.06	0.33^{a}±0.04	0.82^{a}±0.35
>20	18.52^{b}±9.44	27.58^{b}±1.24	30.46^{b}±3.10

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

ในการศึกษา ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด และปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมจากพื้นที่จริง พบว่า มีแนวโน้มแตกต่างกัน กล่าวคือ ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดมีแนวโน้มลดลง แต่ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้นั้น อาจมีหลายสาเหตุ ซึ่งเหตุผลหนึ่งอาจมาจากอิทธิพลของการใส่ปุ๋ยเคมีของเกษตรกรในระหว่างการปลูกอ้อย โดยมีการใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-8 ทั้งหมด 2 ครั้งด้วยกัน ทำให้แคดเมียมมีโอกาสละลายออกมาได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Villarroel, Chang และ Amrhein (1993) ที่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปุ๋ยต่อการดูดดึงแคดเมียม และสังกะสีในพืช พบว่า มีการดูดดึงแคดเมียมเพิ่มขึ้น 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีการใส่ปุ๋ยแอมโมเนีย (NH_4) เช่นเดียวกับ Lorenz และคณะ (1994) ที่ได้รายงานว่า การเพิ่มแคตไอออน (K^+ และ NH_4^+) ในปุ๋ย เป็นสาเหตุสำคัญของการเพิ่มไอออนของโลหะหนักที่มีอยู่ในสารละลายดิน จึงส่งผลทำให้ไอออนของโลหะเหล่านี้ถูกดูดดึงโดยพืชมากขึ้น นอกจากนี้อาจเกิดจากสภาพทางธรณีวิทยาตามธรรมชาติของดิน ที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสารละลายแคดเมียมไอออนที่พืชสามารถดูดดึงได้ เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนหรือเกิดการตกตะกอน ทำให้พืชไม่สามารถดูดดึงไปใช้ได้ จึงทำให้แคดเมียมที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงไปใช้ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

4.2.3 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ในดิน

งานวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อยคือ 3, 6 และ 9 เดือน เพื่อให้ทราบถึงสภาพทางเคมีของดิน ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อย หลังจากได้ทำการเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่ศึกษาไปวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินแล้ว พบว่า พื้นที่ที่มีระดับการปนเปื้อนของแคดเมียม <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (ภาคผนวก ง) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4

จากผลการศึกษา พบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินทั้ง 3 พื้นที่ อยู่ในช่วง pH 6.05-7.53 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของอ้อย และพบว่า ในแต่ละระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เนื่องมาจากสภาพภูมิอากาศของแต่ละช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่างแตกต่างกัน โดยที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 6 เดือน ในทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอยู่ในช่วงฤดูฝน เมื่อดินละลายน้ำแล้วมีการปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออน (H^+) ออกมา ทำให้ดินมีสภาพเป็นกรดมากขึ้น (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544: 60) ดังนั้นจึงมีผลทำให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่ำลงมากกว่าระยะเวลาอื่นๆ

ตารางที่ 4.4 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) จากดินในพื้นที่จริง (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ระยะเวลา (เดือน)	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)
<3	3	7.45±0.03
	6	7.23±0.09
	9	7.50±0.21
3-20	3	6.37±1.10
	6	6.05±1.63
	9	6.28±0.67
>20	3	7.53±0.07
	6	7.26±0.05
	9	7.30±0.33

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของอ้อย ซึ่งโดยปกติ ดินที่เหมาะสมสำหรับการปลูกอ้อยควรมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างอยู่ระหว่าง 6.0-7.5 เนื่องจาก ธาตุอาหารในดินจะละลายออกมาให้อ้อยดูดดึงไปใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด สำหรับดินที่เป็นกรดจัดหรือด่างจัดเกินไป จะทำให้ธาตุอาหารบางชนิดไม่สามารถละลายออกมาให้อ้อยดูดไปใช้ประโยชน์ได้ และมีโอกาสทำให้ธาตุอาหารบางชนิดละลายออกมามากเกินไปจนเป็นพิษแก่อ้อย ซึ่งจากการรายงานของ ปรีชา พราหมณีย์ (2541) ได้สรุประดับความเป็นกรดเป็นด่างในระดับต่างๆ จากดินที่ใช้ในการทำไร่อ้อย ดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 โดยทั่วไป พบว่า พืชมีการดูดดึงแคดเมียมเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างลดลง (Decreasing pH) และพืชสามารถดูดดึงแคดเมียมในดินที่เป็นกรด (Acidic Soil) ได้สูงกว่าดินที่เป็นด่าง (Alkaline Soil) หรือคาร์บอเนต (Calcareous Soil) (Adriano, 2001)

ตารางที่ 4.5 การประเมินระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินในไร่อ้อย

ระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดิน	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)
กรดรุนแรง (Extremely Acid)	<4.5
กรดจัดมาก (Very Strongly Acid)	4.5-5.0
กรดจัด (Strongly Acid)	5.1-5.5
กรดปานกลาง (Moderately Acid)	5.6-6.0
กรดเล็กน้อย (Slightly Acid)	6.1-6.5
เป็นกลาง (Neutral)	6.6-7.3
ด่างอ่อน (Slightly Alkaline)	7.4-7.8
ด่างปานกลาง (Moderately Alkaline)	7.9-8.4
ด่างจัด (Strongly Alkaline)	8.5-9.0
ด่างจัดมาก (Very Strongly Alkaline)	>9.0

ที่มา: ปรีชา พราหมณีย์, 2541

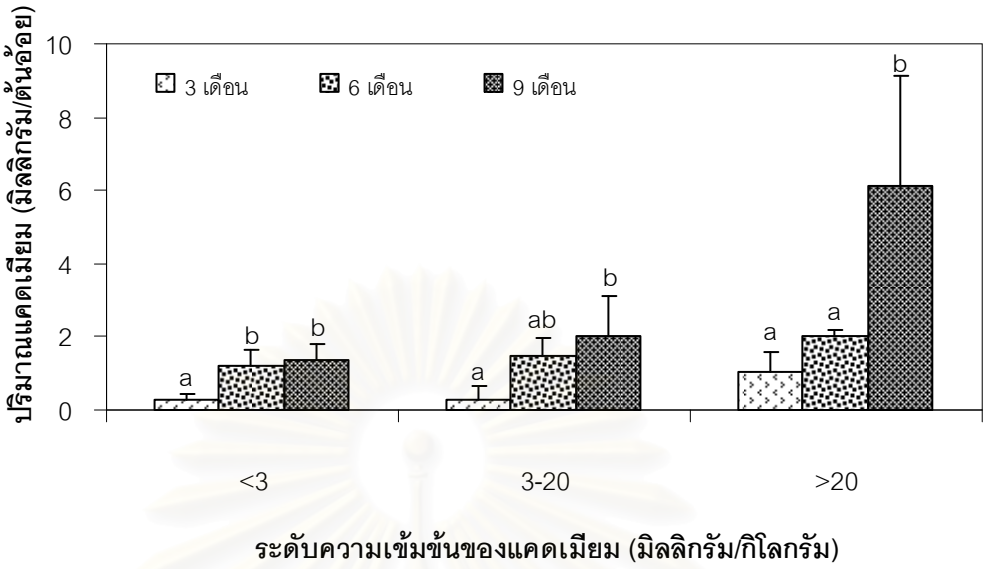
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.4 การสะสมแคดเมียมในอ้อย

การศึกษาการสะสมแคดเมียมในอ้อย ได้ทำการศึกษาเป็น 2 ลักษณะด้วยกัน คือ 1) ศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยครบทุกส่วน และ 2) ศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย ทั้งนี้เพื่อศึกษาศักยภาพโดยรวมทั้งหมดของอ้อย และส่วนของอ้อยที่มีความสามารถในการสะสมแคดเมียมมากที่สุด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ปริมาณการสะสมแคดเมียมของอ้อย

จากผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมรวมทุกส่วนของอ้อย ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 3, 6 และ 9 เดือน ในแต่ละระดับความเข้มข้นของแคดเมียม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 พบว่า ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร a และ b) และมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 1.39, 2.05 และ 6.10 มิลลิกรัมต่อ 1 ต้นอ้อย หรือมีค่าเท่ากับ 4.33, 4.86 และ 6.49 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอ้อย (ตารางที่ 4.6) ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน ซึ่งผลจากการศึกษาของ Rayment และคณะ (2002) ที่ได้ทำการศึกษาการสะสมโลหะหนักในอ้อย โดยมีปริมาณแคดเมียมในดินเริ่มต้นอยู่ที่ระดับ 0.05-0.11 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัม พบว่า อ้อยมีการสะสมแคดเมียมมีค่าเท่ากับ 0.0054 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (น้ำหนักสด) นอกจากนี้ Barzegar และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาการดูดดึงแคดเมียมในดิน พบว่า อ้อยสามารถสะสมแคดเมียมในอ้อย และชานอ้อยได้เท่ากับ 15.8 และ 0.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และพบว่าในกากน้ำตาล และน้ำตาลทรายขาว มีค่าการสะสมแคดเมียมในปริมาณที่น้อยมากจนไม่สามารถหาค่าได้ ซึ่งผลจากงานวิจัยสองเรื่องที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ทำให้ทราบว่าอ้อยมีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมที่มีการปนเปื้อนอยู่ในดินได้ ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาในครั้งนี้โดยพบว่าอ้อยมีแนวโน้มของการดูดดึงแคดเมียมเพิ่มขึ้น ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน และเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง



รูปที่ 4.3 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกส่วนจากพื้นที่จริง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

ตารางที่ 4.6 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยต่อกิโลกรัมจากพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (เดือน)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอ้อย)		
	<3	3-20	>20
3	3.45±1.08	3.53±2.49	4.82±2.00
6	4.12±1.30	4.42±0.92	6.23±1.53
9	4.33±1.01	4.86±1.63	6.49±1.45

นอกจากนี้ สามารถกล่าวได้อีกว่า อ้อยมีความต้องการธาตุอาหารในปริมาณสูง โดยพบว่า ปุ๋ยเคมีที่มีการใส่ในแปลงปลูกอ้อยมีโลหะหนักปนอยู่ด้วย เช่น แคดเมียมและนิกเกิลมีการปนเปื้อนมากขึ้น ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้ สามารถสะสมอยู่ในพืชได้ ทำให้การวิเคราะห์พบปริมาณ

การสะสมแคดเมียมและนิกเกิลในตัวอย่างอ้อย และตัวอย่างดินอย่างเห็นได้ชัด (Barzegar และ Koochekzadeh, 2002)

จากตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม >20 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน อายุอ้อยที่ 3 และ 6 เดือน มีความสามารถในการสะสมแคดเมียมใกล้เคียงกัน และพบการสะสมแคดเมียมในอ้อยแตกต่างจากที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน <3 และ 3-20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.7 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกส่วนจากพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อ 1 ต้นอ้อย)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
<3	0.26±0.19	1.19±0.42	1.39[a]±0.41
3-20	0.36±0.34	1.47±0.52	2.05[a]±1.07
>20	1.03±0.56	2.02±0.19	6.10[b]±3.02

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง และระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน พบว่า อ้อยมีความสามารถในการสะสมแคดเมียมลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก อ้อยที่อายุ 6 และ 9 เดือน เริ่มมีความแก่ และสุก (Maturation and Ripening Phase) และมีอัตราการเจริญเติบโตช้าลง จึงทำให้การดูดดึงแคดเมียมของอ้อยลดลง (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2540a) โดยสามารถสังเกตได้จากที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมของอ้อยมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 และ 9 เดือน โดยอาจมีสาเหตุมาจากปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในดินของพื้นที่จริงมีค่าเริ่มต้นค่อนข้างสูงมาก ซึ่งมีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดเท่ากับ 174.51 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (จากตารางที่ 4.1) แสดงให้เห็นว่าปริมาณแคดเมียมสะสมในดินเริ่มต้น ถือได้ว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดดึงแคดเมียมในพืช (Alloway, 1995b: 136) อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่า

แคดเมียมจัดเป็นจุลธาตุที่อาจทำให้เกิดอันตราย หรือมีความเป็นพิษต่อพืชได้ หากมีระดับความเข้มข้นที่สูง ซึ่งตารางที่ 4.8 แสดงค่าสูงสุดของจุลธาตุที่ยอมรับได้ให้มีอยู่ในดิน และค่าความเป็นพิษที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชที่พบได้ทั่วไป ประกอบกับ เมื่อพิจารณาถึงปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ (ดังรูปที่ 4.2) ที่มีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย จึงเป็นอีกเหตุผลหนึ่ง ที่ทำให้พื้นที่ที่มีระดับความเข้มข้นของแคดเมียม >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยลดลง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.8 ค่าสูงสุดของโลหะหนักที่ยอมรับได้ให้มีอยู่ในดิน และค่าวิกฤติในพืชที่ยับยั้งการเจริญเติบโต

โลหะหนัก	ปริมาณการสะสมโลหะหนักในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง)		ปริมาณการสะสมโลหะหนักในพืช (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง)	
	ค่าที่รับได้	ค่าที่มีความเป็นพิษในพืช	เกิดอาการในพืช	ค่าที่ทำให้ผลผลิตลดลง 10%
สารหนู	2	15-50	n.a.	1-20
แคดเมียม	n.a.	3-5	5-10	10-20
ทองแดง	23	60-100	15-20	10-30
ปรอท	2	2-5	0.5-1	1-8
ตะกั่ว	n.a.	100-400	n.a.	n.a.
สังกะสี	110	250-400	20-30	10-30
นิกเกิล	35	100	150-200	100-500

ที่มา: ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545

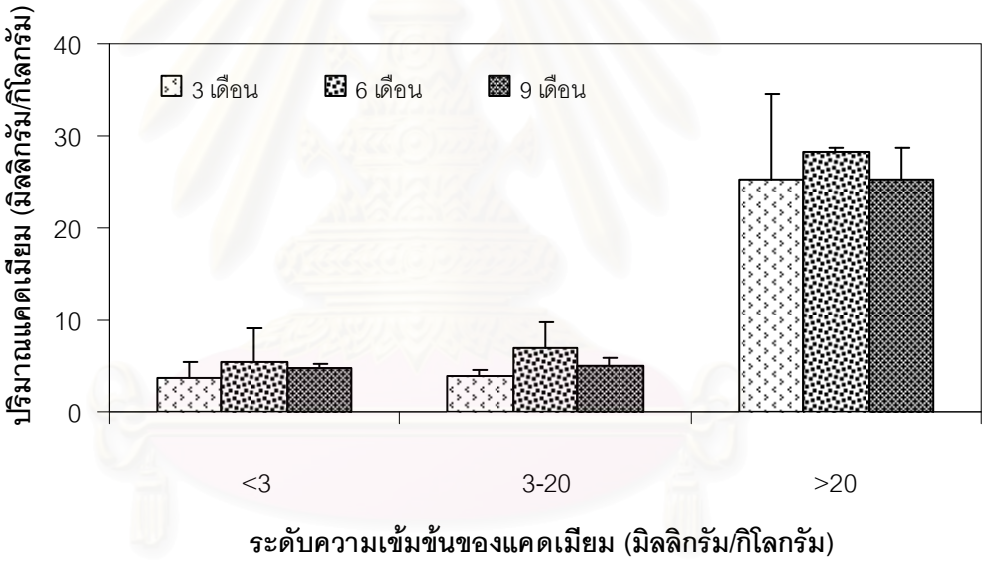
หมายเหตุ n.a. หมายถึง ไม่มีการรายงาน

2) ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย

ในการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อย ได้ทำการแยกส่วนต่างๆ ของอ้อยออกเป็น 5 ส่วน คือ ราก ท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย น้ำอ้อย และใบ โดยมีการเก็บตัวอย่างทั้งหมด 3 ครั้ง ผลของการศึกษาสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

2.1) การสะสมแคดเมียมในส่วนราก

ผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนของรากอ้อยในพื้นที่จริง ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน แสดงไว้ดังรูปที่ 4.4 พบว่า ทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียม <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 6 เดือน ในทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน มีการสะสมแคดเมียมที่รากมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 5.42, 6.88 และ 28.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในรากอ้อย มีแนวโน้มลดลงในทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน



รูปที่ 4.4 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในรากอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

จากตารางที่ 4.9 แสดงระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 3, 6 และ 9 เดือน พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินที่ระดับ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีความแตกต่างจากที่ระดับ <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร a และ b)

ตารางที่ 4.9 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในรากอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

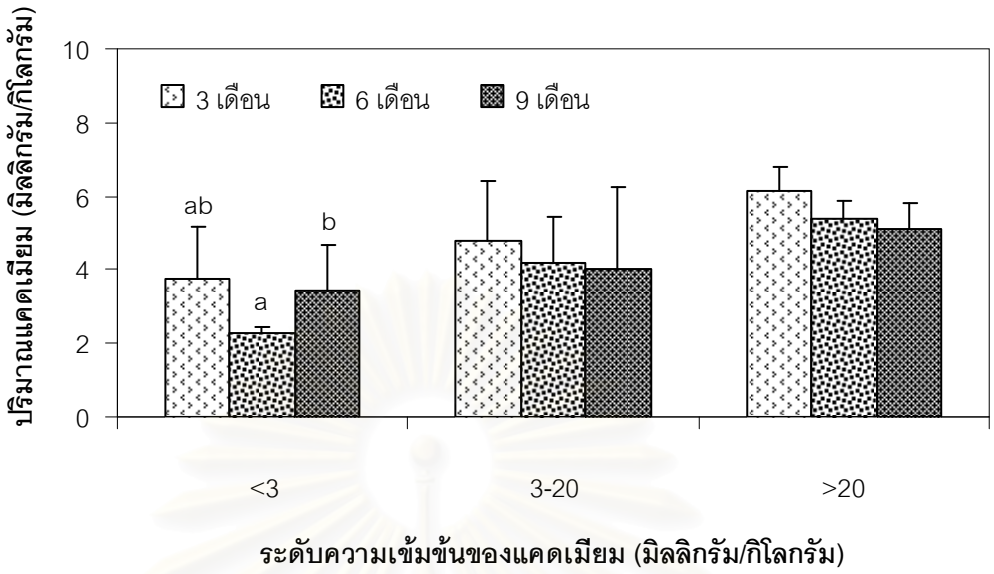
ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
<3	3.60[a]±1.76	5.42[a]±3.81	4.89[a]±0.36
3-20	3.90[a]±0.57	6.88[a]±2.82	5.03[a]±0.74
>20	25.23[b]±9.31	28.35[b]±0.26	25.28[b]±3.33

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

2.2) การสะสมแคดเมียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิม

การศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิมของอ้อยที่ปลูกในพื้นที่จริง ได้ทำการศึกษาส่วนของอ้อยตั้งแต่ส่วนที่อยู่ใต้ดิน (Underground) ลงไปจนถึงราก และผลจากการศึกษานี้ พบว่า แคดเมียมสามารถสะสมอยู่ในท่อนพันธุ์เดิมได้เช่นกัน โดยที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม <3 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมแตกต่างกันตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร a, ab และ b) โดยมีค่าปริมาณการสะสมแคดเมียมเท่ากับ 3.77, 2.28 และ 3.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน ตามลำดับ สำหรับที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 3-20 และ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ค่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 3, 6 และ 9 เดือน ดังรูปที่ 4.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมของอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

จากตารางที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึง ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมมีผลต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิม เมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อยเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการคำนวณทางสถิติ โดยใช้ Analysis of Variance (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 6 เดือน มีความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียม โดยที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม <3 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีค่าแตกต่างจากที่ระดับความเข้มข้น 3-20 และ >20 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งมีค่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมเท่ากับ 2.28, 4.16 และ 5.38 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 3 และ 9 เดือน พบว่า ในแต่ละระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิม

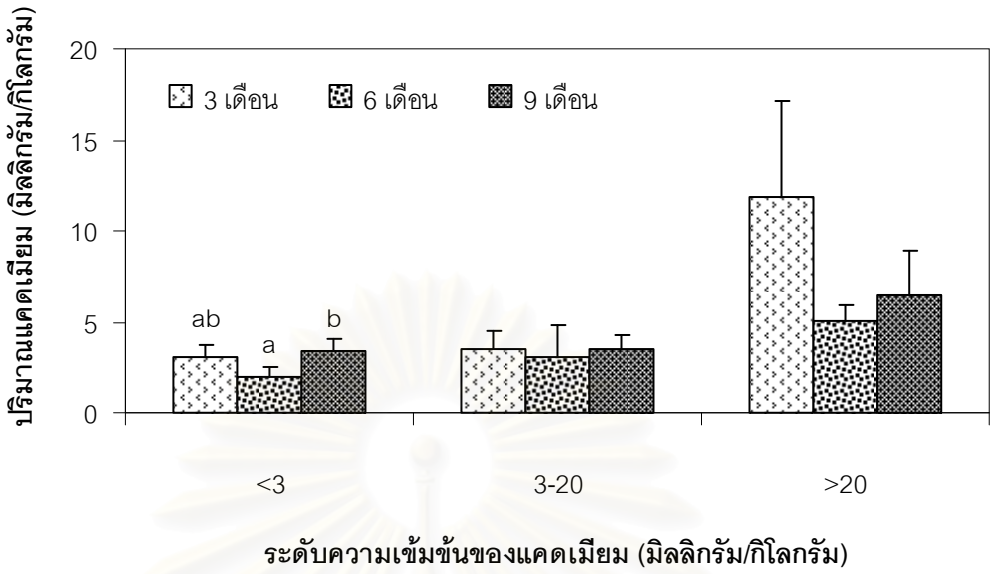
ตารางที่ 4.10 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมของอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
<3	3.77±1.39	2.28[a]±0.17	3.44±1.25
3-20	4.78±1.62	4.16[b]±1.27	4.00±2.25
>20	6.13±0.68	5.38[b]±0.48	5.09±0.72

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

2.3) การสะสมแคดเมียมในส่วนชานอ้อย

เนื่องจากในการเก็บตัวอย่างอ้อยในพื้นที่จริงที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3 เดือน ซึ่งเป็นระยะที่อ้อยมีการแตกกอมากที่สุด และเป็นช่วงที่อ้อยเริ่มเร่งการเจริญเติบโตในส่วนของราก ลำต้น และใบ นอกจากนี้ยังเป็นช่วงที่อ้อยมีขนาด และความยาวของปล้องอ้อยไม่สมบูรณ์ การเจริญเติบโตจึงยังไม่เต็มที่เท่าที่ควร อีกทั้งอ้อยยังไม่มีการสร้างน้ำตาล (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2540a) ดังนั้น ในระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3 เดือนนี้ การเก็บตัวอย่างในส่วนที่เป็นลำต้นของอ้อย พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในลำต้นที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 3-20 และ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยในระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 3 เดือน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในลำต้นมากกว่าอ้อยที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 และ 9 เดือน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 ในขณะที่ปริมาณการสะสมแคดเมียมในลำต้นที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม <3 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (กลุ่มอักษร a, ab และ b)



รูปที่ 4.6 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

เมื่อพิจารณาในตารางที่ 4.11 เป็นการศึกษาถึงระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่มีผลต่อการสะสมแคดเมียมในชานอ้อยเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อยที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3 และ 6 เดือน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร a, ab และ b) โดยที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน โดยมีค่าปริมาณการสะสมแคดเมียมที่ชานอ้อยสูงสุดเท่ากับ 11.86 และ 5.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3 และ 6 เดือน ตามลำดับ อีกทั้งมีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากกว่าที่ระดับ 3-20 และ <3 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ หากแต่ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.11 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
<3	3.08[a]±0.66	1.94[a]±0.61	3.43±0.60
3-20	3.53[a]±1.00	3.12[ab]±1.67	3.54±0.77
>20	11.86[b]±5.32	5.03[b]±0.93	6.48±2.40

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

2.4) การสะสมแคดเมียมในส่วนน้ำอ้อย

การสะสมแคดเมียมในส่วนของน้ำอ้อย มีลักษณะเช่นเดียวกับการสะสมแคดเมียมในส่วนของชานอ้อย กล่าวคือ ในการศึกษาที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3 เดือนนั้น พบว่า ต้นอ้อยยังไม่มีการสร้างน้ำตาล จึงทำให้ไม่มีผลของน้ำอ้อยในเดือนที่ 3 ของการเก็บตัวอย่างนี้ ซึ่งจากผลการศึกษาที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 และ 9 เดือน พบว่า มีเพียงระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดินเท่านั้น ที่สามารถตรวจหาค่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยได้ โดยมีค่าเท่ากับ 0.08 และ 0.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 6 และ 9 เดือน ตามลำดับ โดยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.12 (คำนวณจากความหนาแน่นของน้ำอ้อย 1.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, ภาคผนวก ก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยของพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
<3	-	ND	ND
3-20	-	ND	ND
>20	-	0.08±0.07	0.11±0.10

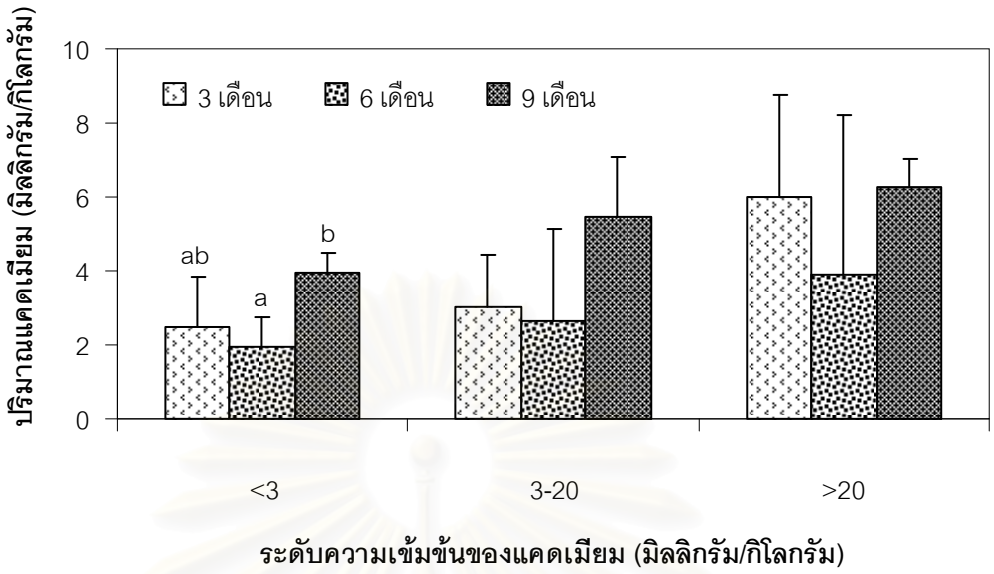
หมายเหตุ - หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ND หมายถึง มีปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถวัดค่าได้

2.5) การสะสมแคดเมียมในส่วนใบอ้อย

การศึกษาการสะสมแคดเมียมในส่วนใบอ้อย ได้แยกส่วนที่เป็นใบตั้งแต่ส่วนปลายสุดของลำต้น โดยรวมถึงส่วนที่เป็นยอดด้วย ซึ่งผลการศึกษาได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 และพบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน <3 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร a, ab และ b) ในขณะที่ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 3-20 และ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ได้ผลที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใบ ยังพบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยมีแนวโน้มลดลงในเดือนที่อ้อยมีอายุ 6 เดือน และเพิ่มขึ้นในเดือนที่อ้อยมีอายุ 9 เดือน ทั้ง 3 ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 4.13 ซึ่งเป็นการศึกษาผลของระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินต่อการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อย มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างต่างกัน โดยที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม >20 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยมากกว่าทุกระดับความเข้มข้น โดยมีค่าเท่ากับ 5.98, 3.87 และ 6.30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.13 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยจากพื้นที่จริง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
<3	2.49±1.37	1.96±0.80	3.97^{a}±0.52
3-20	3.05±1.38	2.63±2.51	5.47^{ab}±1.62
>20	5.98±2.79	3.87±4.36	6.30^{b}±0.71

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

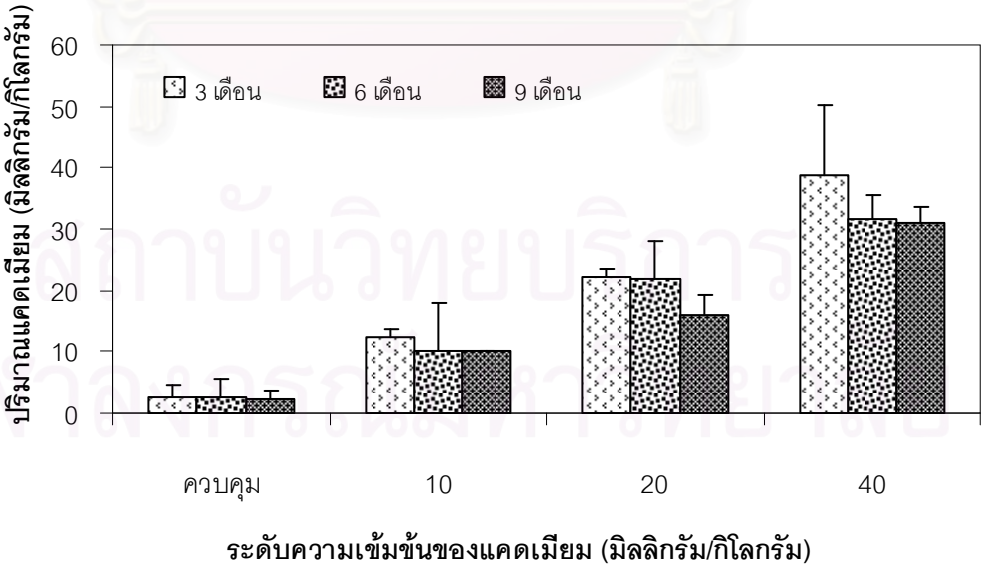
4.3 การดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในเรือนทดลองของอำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี

4.3.1 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

การศึกษาการดูดดึงแคดเมียมในดินที่ปนเปื้อนด้วยอ้อยที่ปลูกในเรือนทดลอง ซึ่งเป็นการทดลองในส่วนที่สอง โดยได้ทำการศึกษาปริมาณการสะสมของแคดเมียมทั้งหมดที่มีการปนเปื้อนในดิน ซึ่งได้มีการวางแผนการทดลอง โดยแบ่งระดับความเข้มข้นของแคดเมียมออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน โดยได้มีการเก็บตัวอย่างดินก่อนใส่สารประกอบแคดเมียม เพื่อทำการตรวจหาคุณสมบัติของดินเบื้องต้นตามค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และได้ทำการปลูกอ้อย ลงในภาชนะปลูกที่มีดินสำหรับปลูก 50 กิโลกรัมต่อภาชนะปลูก ดูแลรักษาจนกระทั่งต้นอ้อยเจริญเติบโต แข็งแรง มีความทนทานต่อสภาพภูมิอากาศ ประมาณ 2 เดือน เพื่อเป็นการยืนยันว่า ต้นอ้อยที่ใช้ในการทดลองนี้ มีอัตราการรอด 100 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการใส่สารประกอบแคดเมียมไนเตรทลงในดินทดลอง มีการรดน้ำโดยตลอดการทดลอง จนครบระยะเวลาของการศึกษาที่ 3, 6 และ 9 เดือน (นับจากใส่สารประกอบแคดเมียม) นอกจากนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มไปทำการวิเคราะห์ เพื่อหาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินตามระยะเวลาดังกล่าว

นอกจากนี้ ได้มีการยืนยันผลของการใส่สารประกอบแคดเมียม ด้วยการทำการประกันและควบคุมคุณภาพ (QA/QC) ของดิน โดยใส่สารประกอบแคดเมียมลงในภาชนะปลูกที่มีขนาดและปริมาณดินเท่ากับที่ใช้ทดลองจริง แต่ไม่มีการปลูกอ้อยลงภาชนะปลูกทดลอง หากแต่มีการรดน้ำลงในดินสำหรับตรวจสอบเช่นเดียวกับการปลูกอ้อยในภาชนะปลูกทดลอง หลังจากนั้น เมื่อครบระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างได้แบ่งดินออกเป็น 3 ส่วน และนำไปหาปริมาณแคดเมียมในดิน พบว่า ค่าปริมาณแคดเมียมในแต่ละระดับที่อยู่ในภาชนะปลูก ไม่มีความแตกต่างกัน สามารถยืนยันได้ว่า แคดเมียมมีการกระจายอยู่ทั่วกันในภาชนะปลูก

อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในดินในแต่ละระดับความเข้มข้นของแคดเมียม ได้แก่ ที่ระดับควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 โดยผลจากการศึกษานี้ พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินมีแนวโน้มลดลง ทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่ควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน อย่างไรก็ตาม ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งเป็นระดับที่มีความเข้มข้นสูงสุดของการทดลองนี้ พบว่า มีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินลดลงจาก 38.96, 31.65 และ 30.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน ตามลำดับ หากแต่ปริมาณการสะสมของแคดเมียมมีแนวโน้มลดลง ในแต่ละระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเมื่ออายุของอ้อยเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่า อ้อยมีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมในดินที่ปนเปื้อนได้



รูปที่ 4.8 ปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในดินจากเรือนทดลอง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

จากตารางที่ 4.14 แสดงระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในดิน ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร a, b, ab, bc และ c) โดยปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินแต่ละระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.14 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินจากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
ควบคุม	2.54^{a}±2.13	2.49^{a}±2.91	2.25^{a}±1.34
10	12.47^{ab}±1.31	10.05^{a}±2.36	9.99^{b}±0.19
20	22.32^{bc}±1.09	21.80^{b}±6.26	16.13^{c}±1.32
40	38.96^{c}±11.23	31.65^{b}±3.94	30.91^{d}±2.52

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

จากตารางที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่า อ้อยที่ปลูกในเรือนทดลองมีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินได้ ซึ่งแสดงได้ในรูปของเปอร์เซ็นต์การลดลงของแคดเมียม ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 9 เดือน พบว่า สามารถลดปริมาณแคดเมียมลงได้ประมาณ 15-28 เปอร์เซ็นต์ และพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของแคดเมียมมากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 28.79 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากปริมาณแคดเมียมทั้งหมดที่ลดลงนี้ อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ เพราะมีการใส่สารประกอบแคดเมียมไนเตรท จึงทำให้มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของแคดเมียมในดินค่อนข้างมาก

ตารางที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์การลดลงของปริมาณแคดเมียมในดินจากเรือนทดลอง

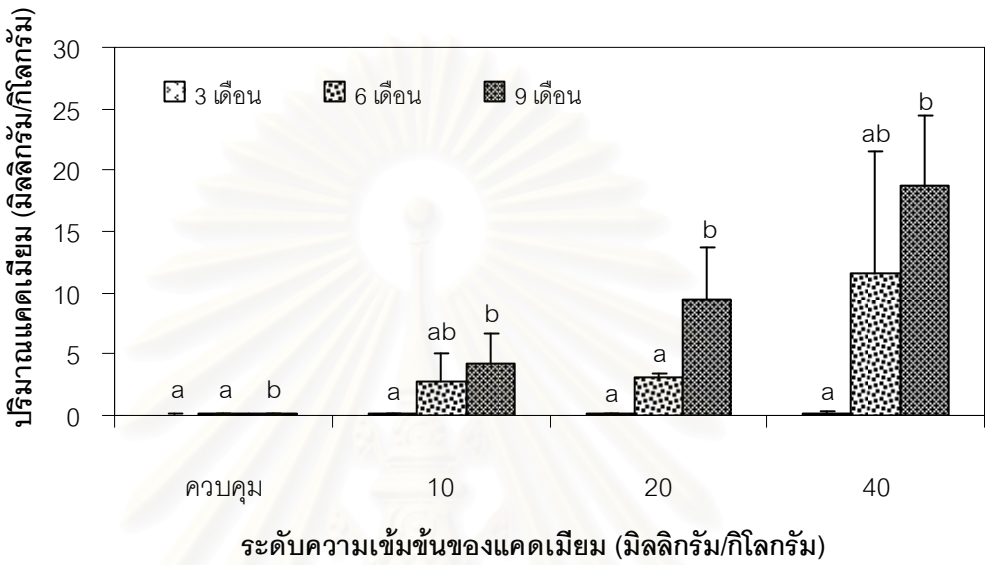
ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมเริ่มต้น[a] (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมที่เวลา 9 เดือน[a] (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	% การลดลงของแคดเมียมในดิน
ควบคุม	132.55	112.45	15.16
10	632.55	499.35	21.06
20	1,132.55	806.5	28.79
40	2,132.55	1,545.65	27.52

หมายเหตุ a หมายถึง ปริมาณแคดเมียมคำนวณจากดิน 50 กิโลกรัมต่อภาชนะปลูก

4.3.2 แคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้

การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในดินที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้นี้ จำเป็นต้องใช้สารที่มีสมบัติเป็นกรดอ่อน เป็นกลาง และเป็นสารคีเลต เพื่อใช้ในการสกัดแคดเมียมออกมาจากดิน (Adriano, 2001: 271) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สารสกัด DTPA โดยเริ่มจากการสุ่ม และเก็บตัวอย่างดินทดลองในเรือนทดลอง เพื่อทำการศึกษาปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ จากตัวอย่างดินทดลองทั้ง 4 ระดับความเข้มข้นได้แก่ ควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออ้อยมีอายุเพิ่มขึ้น โดยช่วงเวลาของการเก็บตัวอย่าง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ในทุกๆ ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (กลุ่มอักษร a, ab และ b) กล่าวคือ ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่าระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 9 เดือน มีปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ มีค่าเท่ากับ 9.48 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แตกต่างกันจากที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 3 และ 6 เดือน (กลุ่มอักษร a และ b) โดยมีค่าเท่ากับ 0.11 และ 3.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3 เดือน พบว่าปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ มีความแตกต่างกันจากที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน หากแต่ไม่แตกต่างกันจากที่ระยะเวลาของการเก็บ

ตัวอย่าง 6 เดือน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.22, 11.54 และ 18.69 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้จากเรือนทดลอง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

จากผลการศึกษาดังตารางที่ 4.16 เมื่อพิจารณาถึงระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินต่อปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ พบว่า ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 และ 9 เดือน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉพาะที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน เมื่อนำมาคำนวณค่าทางสถิติ พบว่า ทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.17, 4.20, 9.48 และ 18.69 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.16 ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้จากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
ควบคุม	0.08±0.03	0.11^{a}±0.02	0.17^{a}±0.03
10	0.09±0.03	2.70^{ab}±2.35	4.20^{ab}±2.48
20	0.11±0.08	3.15^{ab}±0.21	9.48^{b}±4.14
40	0.22±0.11	11.54^{b}±9.98	18.69^{c}±5.76

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

4.3.3 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ในดิน

การศึกษาค่าความเป็นกรดเป็นด่างในดินจากการทดลองในเรือนทดลอง พบว่า ทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินได้แก่ ควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อยที่ 3, 6 และ 9 เดือน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.17

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.17 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) จากดินในเรือนทดลอง (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ระยะเวลา (เดือน)	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)
ควบคุม	3	4.57±0.23
	6	4.57±0.31
	9	4.58±0.09
10	3	4.82±0.01
	6	5.00±0.16
	9	4.87±0.16
20	3	4.81±0.09
	6	4.77±0.13
	9	4.94±0.02
40	3	4.89±0.26
	6	4.64±0.05
	9	4.96±0.11

จากผลการศึกษาในครั้งนี้ พบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินอยู่ในช่วง pH 4.57-5.00 ซึ่งเป็นช่วงกรดจัดมาก ซึ่งอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของอ้อย นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 6 เดือน ในทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมมีค่าลดลง เนื่องจากเป็นช่วงฤดูฝน และด้วยคุณสมบัติของเนื้อดินที่นำมาทำการทดลองในครั้งนี้ เป็นดินเหนียวปนทราย (Sandy Clay) จึงทำให้ดินมีการอุ้มน้ำไว้มากขึ้น ประกอบกับในการทดลองได้มีการหุ้มแผ่นพลาสติกเพื่อรองรับน้ำไม่ให้ออกสู่สิ่งแวดล้อมด้านนอก ทำให้ดินอุ้มน้ำไว้มาก ซึ่งอาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ดินมีสภาพเป็นดินกรด นอกจากนี้ อีกสาเหตุหนึ่งที่ได้มีการพิจารณาคือการใส่ปุ๋ยเคมีอาจมีผลทำให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินลดลงได้ ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Kashem และ Singh (2002) ที่ได้ทำการศึกษาผลของการเติมปุ๋ยที่มีความสามารถในการละลายได้ของแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสีในดิน โดยพืชสามารถนำไปใช้ในรูปแบบที่พืชสามารถดูดดึงได้ โดยในการทดลองได้ใช้ผักทดลอง 3 ชนิด คือ หัวไชเท้า (Radish) ข้าวโอ๊ต (Oat) และผักบุ้งจีน (Water Spinach) ปลูกในดินที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก โดยหลังจากที่ปลูกผักทดลองเป็นเวลา 7 วัน ได้มีการใส่ปุ๋ยทุกวัน และทุกๆ แปลงทดลอง โดยผลจากการศึกษาพบว่าการเติมปุ๋ยลงไปในดินมีผลต่อความเป็นกรดเป็นด่างของดิน และสารละลายในดิน โดยพืชแต่ละ

ชนิดมีปริมาณความเข้มข้นของแคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม แคดเมียม นิกเกิล และสังกะสีในเนื้อเยื่อพืชแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่า แนวโน้มของค่าความเป็นกรดเป็นด่างในดินของแปลงผักบุ้งจีน < หัวไชเท้า < ข้าวโอ๊ต ซึ่งผลจากการละลายได้มากที่สุดของผักบุ้งจีนนี้ ทำให้เนื้อเยื่อพืชมีความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสีในปริมาณที่สูงกว่าหัวไชเท้า และข้าวโอ๊ตตามลำดับ นอกจากนี้ ปริมาณของน้ำฝนที่ตกลงมา มีส่วนทำให้ธาตุอาหารของพืชที่มีอยู่ในดินถูกชะล้างไป เช่น แคลเซียม และแมกนีเซียม ตลอดจนการสะสมของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายเป็นเวลานานๆ ในสภาพน้ำขัง ก็อาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดดินกรดได้ (เกษมศรี ซับซ้อน, 2541: 87) ทั้งนี้เมื่อดินละลายน้ำแล้วมีการปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออน (H^+) ออกมา นอกจากนี้ แคตไอออนบวกอื่นๆ ที่เป็นกรดที่สำคัญในดินคือ อะลูมินัมไอออน (Al^{3+}) และ เฟอริกไอออน (Fe^{3+}) รวมถึงแคตไอออนของโลหะทรานซิชันอื่นๆ ที่ได้แสดงสมบัติเป็นกรดอ่อน โดยสามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แล้วปลดปล่อย H^+ ออกมาในสารละลาย (ไพบูลย์ วิวัฒน์วงศ์วนา, 2546: 172) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ดินมีสภาพเป็นกรดมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาอื่นๆ ของการเก็บตัวอย่าง พบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ในดินทดลองจากเรือนทดลองมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

$$Al^{3+}(aq) + H_2O(l) \rightleftharpoons Al(OH)^{2+}(aq) + H^+(aq)$$

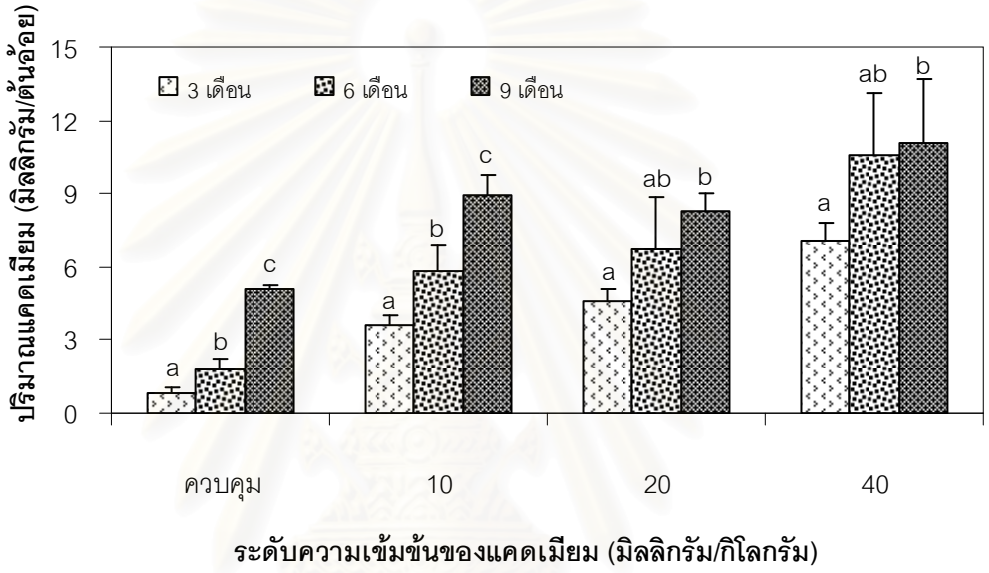
รูปที่ 4.10 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของอะลูมินัมไอออนกับน้ำ

4.3.4 การสะสมแคดเมียมในอ้อย

1) ปริมาณการสะสมแคดเมียมของอ้อย

การศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมรวมในทุกส่วนของอ้อย ที่ระดับความเข้มข้นของชุดควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในอ้อย ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ในทุกๆ ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.11 และมีแนวโน้มของการ

สะสมแคดเมียมในทุกส่วนของอ้อยเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน มีค่าเท่ากับ 5.09, 8.21, 8.87 และ 14.34 มิลลิกรัมต่อ 1 ต้นอ้อย หรือมีค่าเท่ากับ 8.66, 15.65, 17.47 และ 28.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอ้อย (ตารางที่ 4.18) ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกส่วนจากเรือนทดลอง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

ตารางที่ 4.18 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยต่อกิโลกรัมจากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (เดือน)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอ้อย)			
	ควบคุม	10	20	40
3	3.05±0.99	11.35±0.59	15.47±2.00	21.29±2.87
6	3.61±0.74	13.41±3.03	16.13±5.23	23.15±3.99
9	8.66±0.50	15.65±1.36	17.47±0.81	28.94±7.01

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินจากเรือนทดลองต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกส่วน ดังตารางที่ 4.19 พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร a, b, c และ d) ของทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง โดยที่ระยะเวลา 3 เดือน พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อย ทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินจากเรือนทดลอง มีความแตกต่างกันทั้งหมด ซึ่งมีค่าของการสะสมแคดเมียมเท่ากับ 0.79, 3.53, 4.50 และ 6.95 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่ควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ สำหรับที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 และ 9 เดือน พบว่า อ้อยมีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 10 และ 20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (กลุ่มอักษร b)

ตารางที่ 4.19 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกส่วนจากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อ 1 ต้นอ้อย)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
ควบคุม	0.79^{a}±0.26	1.78^{a}±0.40	5.09^{a}±0.13
10	3.53^{b}±0.43	5.80^{b}±1.06	8.21^{a}±0.72
20	4.50^{c}±0.49	6.67^{b}±2.10	8.87^{a}±0.82
40	6.95^{d}±0.71	10.44^{c}±2.49	14.34^{b}±3.99

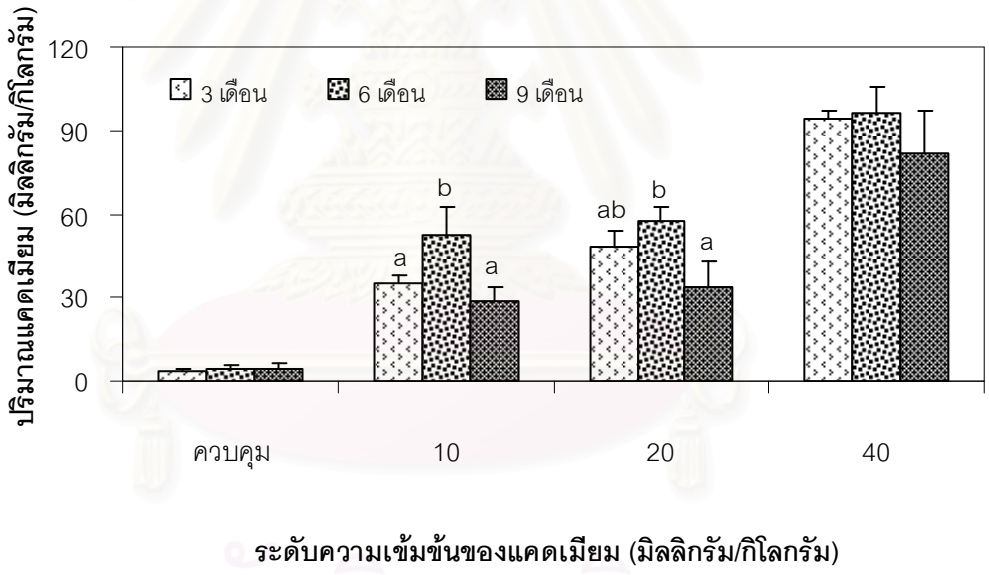
หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

2) ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย

2.1) การสะสมแคดเมียมในส่วนราก

จากผลการศึกษาการสะสมแคดเมียมในส่วนของรากอ้อยในเรือนทดลอง ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม ควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ตามระยะเวลา

ของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในรากอ้อยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร a, ab และ b) ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 10 และ 20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.12 สำหรับระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ควบคุม และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หรือสามารถกล่าวได้ว่า ในทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินจากเรือนทดลอง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 เดือน และมีค่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในรากเท่ากับ 4.63, 52.12, 57.60 และ 96.57 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นคือ ควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมมีแนวโน้มลดลงที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน ในทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียม



รูปที่ 4.12 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในรากอ้อยจากเรือนทดลอง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

จากตารางที่ 4.20 พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมที่รากแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร a, b, c และ d) ทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 3 เดือน สำหรับระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 และ 9 เดือน ในระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 10 และ 20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (กลุ่มอักษร b) โดยทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง มีแนวโน้มของปริมาณการสะสมแคดเมียมในรากเพิ่มขึ้น ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินจากเรือนทดลองที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.20 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในรากอ้อยจากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

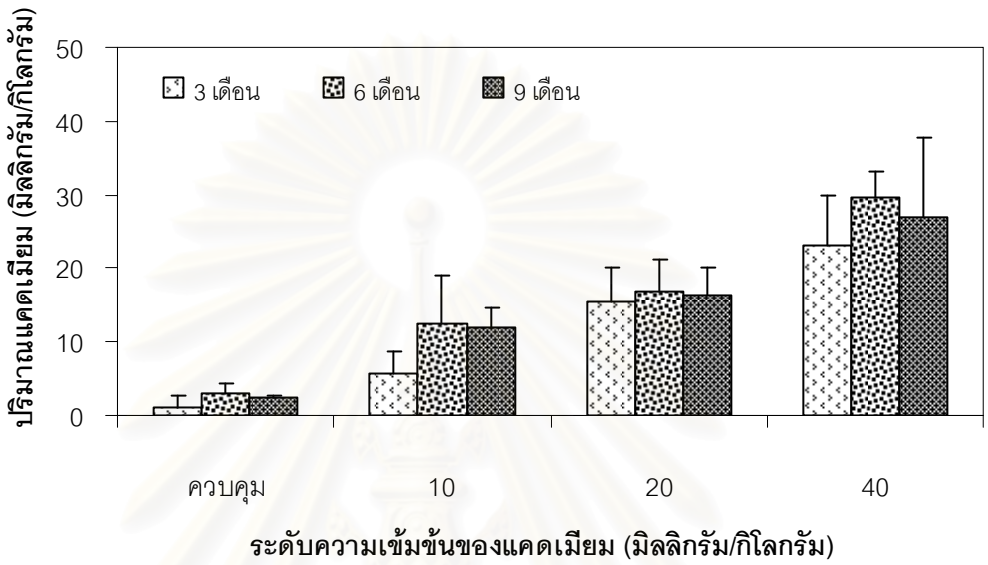
ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
ควบคุม	3.94^{a}±0.71	4.63^{a}±1.44	4.61^{a}±1.63
10	35.17^{b}±3.11	52.12^{b}±10.12	28.40^{b}±5.34
20	47.87^{c}±6.32	57.60^{b}±4.68	33.53^{b}±9.65
40	94.35^{d}±2.47	96.57^{c}±9.12	81.97^{c}±15.17

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

2.2) การสะสมแคดเมียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิม

การศึกษาในครั้งนี้ ได้ทำการเก็บตัวอย่างตั้งแต่ส่วนที่อยู่ต่ำกว่าดิน รวมถึงท่อนพันธุ์ที่ใช้ในการปักชำด้วย ซึ่งเป็นการศึกษาที่มีการทดสอบระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อยต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมของอ้อย พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ในทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินจากเรือนทดลอง เมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อยต่างกัน ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.13 ทั้งนี้ปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 เดือน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุดเท่ากับ 3.12, 12.54, 16.93 และ 29.68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินได้แก่ ควบคุม, 10, 20

และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน และมีแนวโน้มของการสะสมลดลงที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน ในทุกๆ ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินจากเรือนทดลอง



รูปที่ 4.13 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมจากเรือนทดลอง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

จากตารางที่ 4.21 แสดงให้เห็นถึง ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินจากเรือนทดลองต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิม พบว่า ทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย มีความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร a, b, ab, bc และ c) โดยเฉพาะในระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 เดือน ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 10 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีค่าแตกต่างจากที่ระดับความเข้มข้นควบคุม (กลุ่มอักษร a) และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน (กลุ่มอักษร c) หากแต่ไม่มีความแตกต่างกันจากระดับความเข้มข้นที่ 20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน (กลุ่มอักษร b)

ตารางที่ 4.21 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมจากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
ควบคุม	1.01^{a}±1.75	3.11^{a}±1.35	2.43^{a}±0.39
10	5.80^{a}±2.85	12.54^{b}±6.56	12.03^{ab}±2.62
20	15.43^{b}±4.71	16.93^{b}±4.31	16.18^{bc}±3.99
40	23.07^{b}±6.70	29.68^{c}±3.53	26.79^{c}±10.86

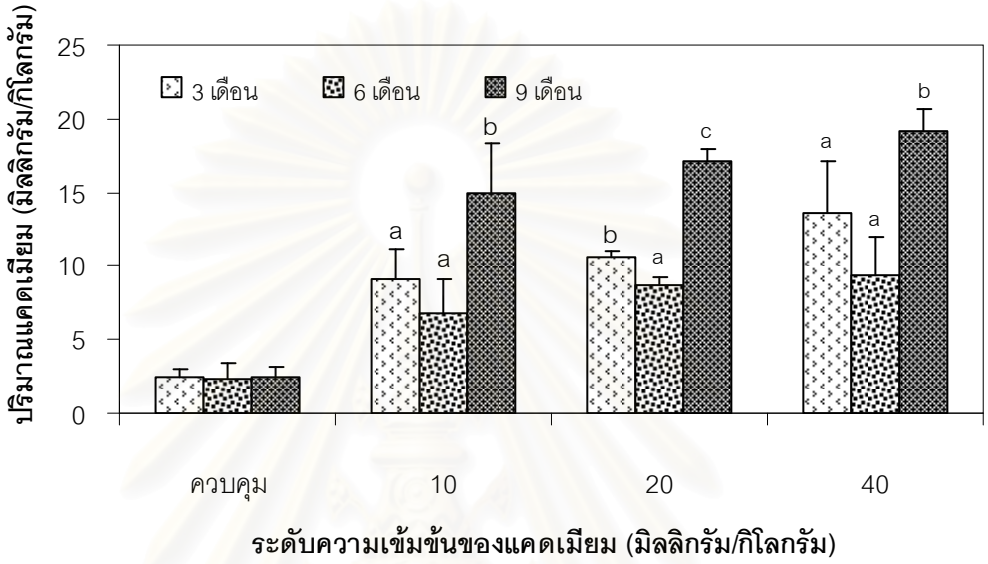
หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

2.3) การสะสมแคดเมียมในส่วนชานอ้อย

จากการใส่สารประกอบแคดเมียมไนเตรท ภายหลังจากที่อ้อยมีอายุได้ประมาณ 2 เดือน และเมื่อครบระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อยในเรือนทดลอง ที่ระยะเวลา 3 เดือน อ้อยจึงมีอายุเท่ากับ 5 เดือน ซึ่งอยู่ในระยะย่างปล้อง (Stalk Elongation Phase) อ้อยจึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น และความยาวของปล้องเพิ่มขึ้น อีกทั้งเป็นระยะที่เริ่มมีการสร้างน้ำตาลเพิ่มขึ้นด้วย (Vered และ Rao, 2007)

ดังนั้นผลจากการศึกษาในครั้งนี้ จึงพบว่า การสะสมแคดเมียมในชานอ้อยที่ระดับควบคุม หรือ 0 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ไม่มีการใส่สารประกอบแคดเมียมไนเตรท ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น สำหรับที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อย มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร a, b และ c) โดยในระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อยที่ 9 เดือน พบว่า มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อยมากกว่าที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3 และ 6 เดือน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.14 โดยมีค่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อยเท่ากับ 2.38, 14.91, 17.14 และ 19.09 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามระดับ

ความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่เพิ่มขึ้นได้แก่ ควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อยจากเรือนทดลอง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

ดังนั้นเมื่อพิจารณาในตารางที่ 4.22 พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน โดยที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 เดือน พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (กลุ่มอักษร b) สำหรับที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3 และ 9 เดือน พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อย ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนชานอ้อยไม่มีความแตกต่างกันกับที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 10 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน (กลุ่มอักษร bc) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.22 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อยจากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
ควบคุม	2.38^{a}±0.56	2.33^{a}±0.99	2.38^{a}±0.73
10	9.14^{b}±1.98	6.84^{b}±2.28	14.91^{b}±3.45
20	10.65^{bc}±0.40	8.66^{b}±0.62	17.14^{bc}±0.80
40	13.52^{c}±3.55	9.38^{b}±2.57	19.09^{c}±1.58

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

2.4) การสะสมแคดเมียมในส่วนน้ำอ้อย

การสะสมแคดเมียมในส่วนน้ำอ้อย จากตารางที่ 4.23 พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนของน้ำอ้อยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยเพิ่มขึ้น และไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ผลจากการศึกษายังพบว่า ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยมากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.17, 0.82, 0.88 และ 1.39 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่ ควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัม (คำนวณจากความหนาแน่นน้ำอ้อย 1.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, ภาคผนวก ก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.23 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยจากเรือนทดลอง ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (เดือน)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	ควบคุม	10	20	40
3	ND	0.35±0.07	0.65±0.06	0.95±0.08
6	0.06[a]±0.06	0.51±0.14	0.76±0.24	1.19±0.24
9	0.17[b]±0.01	0.82±0.37	0.88±0.37	1.39±.35

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

ND หมายถึง มีปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถวัดค่าได้

นอกจากนี้ตารางที่ 4.24 พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนของน้ำอ้อยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำค่ามาทดสอบทางสถิติแล้วพบว่า ทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร a, b, ab, c และ d) นอกจากนี้ในระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 3 เดือน พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยมีความแตกต่างกัน ความแตกต่างอย่างเห็นได้อย่างเด่นชัด กล่าวคือ ในน้ำอ้อยทุกช่วงเวลาของการเก็บตัวอย่าง และในทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับการศึกษาปริมาณโลหะหนักในดิน และอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ภาคกลาง ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ของศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย (2005) ซึ่งรายงานว่า พบปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างดินจากพื้นที่ปลูกอ้อยอยู่ในระดับ 0.99-2.02 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ในทุกพื้นที่ปลูกอ้อยดังกล่าว โดยพบปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อย และน้ำอ้อย มีค่าน้อยมากจนไม่สามารถหาค่าได้ เนื่องจากปริมาณแคดเมียมในดินเริ่มต้นของพื้นที่ศึกษามีระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมต่ำ ซึ่งในปัจจุบันยังไม่พบการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อย หรือกล่าวได้ว่ายังไม่พบว่ามีรายงานค่า MRL หรือปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุดในอาหาร

ตารางที่ 4.24 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยจากเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

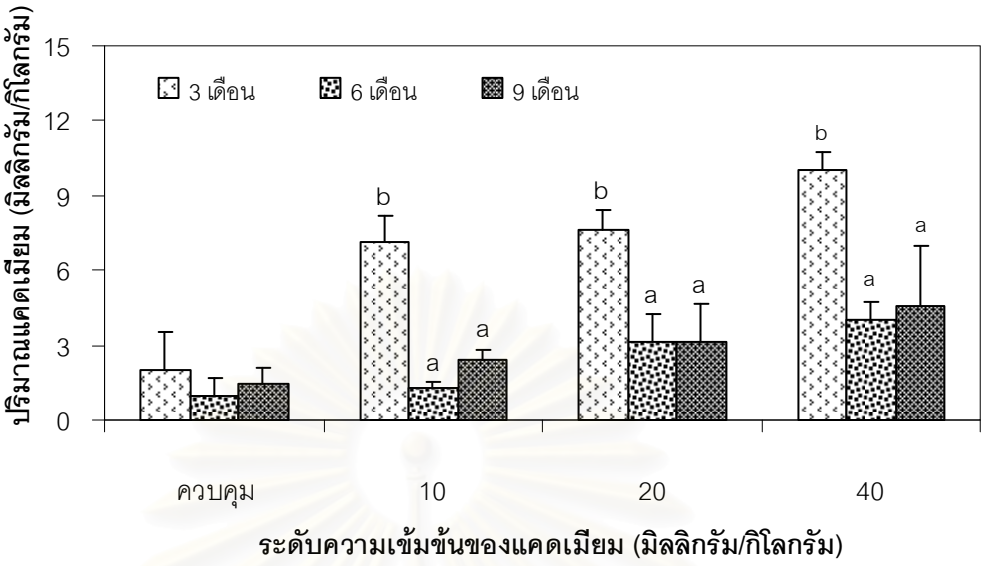
ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
ควบคุม	ND[a]	0.06[a]±0.06	0.17[a]±0.01
10	0.35[b]±0.07	0.51[b]±0.14	0.82[ab]±0.37
20	0.65[c]±0.06	0.76[b]±0.24	0.88[ab]±0.37
40	0.95[d]±0.07	1.19[c]±0.24	1.39[b]±0.35

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

ND หมายถึง มีปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถวัดค่าได้

2.5) การสะสมแคดเมียมในส่วนใบอ้อย

ผลจากการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใบอ้อย พบว่า ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 3 เดือน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยมากกว่าระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 และ 9 เดือน โดยมีค่าเท่ากับ 1.98, 7.10, 7.62 และ 9.99 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินคือ ควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน และที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดินเช่นกัน พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร a และ b) เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.15 หรือกล่าวได้ว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใบมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อยที่ 6 เดือน หรือมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 9 เดือน ของทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน



รูปที่ 4.15 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยจากเรือนทดลอง ตามระยะของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

นอกจากนี้ จากตารางที่ 4.25 เป็นการศึกษาผลของระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น พบว่าระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่ระยะเวลาต่างกัน มีแนวโน้มของการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยเพิ่มสูงขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.25 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยของเรือนทดลอง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)		
	3 เดือน	6 เดือน	9 เดือน
ควบคุม	1.99^{a}±1.54	0.99^{a}±0.69	1.43^{a}±0.65
10	7.10^{b}±1.07	1.30^{a}±0.22	2.41^{ab}±0.43
20	7.62^{b}±0.81	3.15^{b}±1.08	3.15^{ab}±1.47
40	9.99^{c}±0.73	3.99^{b}±0.76	4.60^{b}±2.40

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

4.4 ความสามารถของการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน จากพื้นที่จริงกับเรือนทดลอง

วัตถุประสงค์ในงานศึกษาวิจัยครั้งนี้ เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมในดิน และปริมาณการลดลงของระดับการปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่จริงของอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ที่ประสบปัญหาอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาควบคู่ไปกับการปลูกอ้อยในเรือนทดลอง ที่ได้จำลองสถานภาพของดินให้มีการปนเปื้อนเช่นเดียวกับในพื้นที่จริง โดยมีการเติมสารประกอบแคดเมียมไนเตรทใส่ลงไปในดินสำหรับทดลอง และเลือกใช้ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมไนเตรท 4 ระดับความเข้มข้นด้วยกัน ได้แก่ 1) ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 0 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน หรือ ดินชุดควบคุม ที่มีการปลูกอ้อยแต่ไม่ใส่สารประกอบแคดเมียมไนเตรท เช่นเดียวกับในระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมในพื้นที่จริงที่ระดับ <3 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน โดยทั้งสองส่วนของการทำวิจัยนี้ พบว่า ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดที่สะสมในดินเริ่มต้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน (จากตารางที่ 4.1) และมีค่าน้อยกว่า 3 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน 2) ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 10 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน 3) ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งเหตุผลที่เลือกใช้ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 10 และ 20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน เนื่องจากเป็นระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน 2 เท่า และอยู่ในช่วงเดียวกันกับระดับการปนเปื้อนแคดเมียมในดินจากพื้นที่จริงที่ 3-20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน และ 4) ระดับความเข้มข้นของ

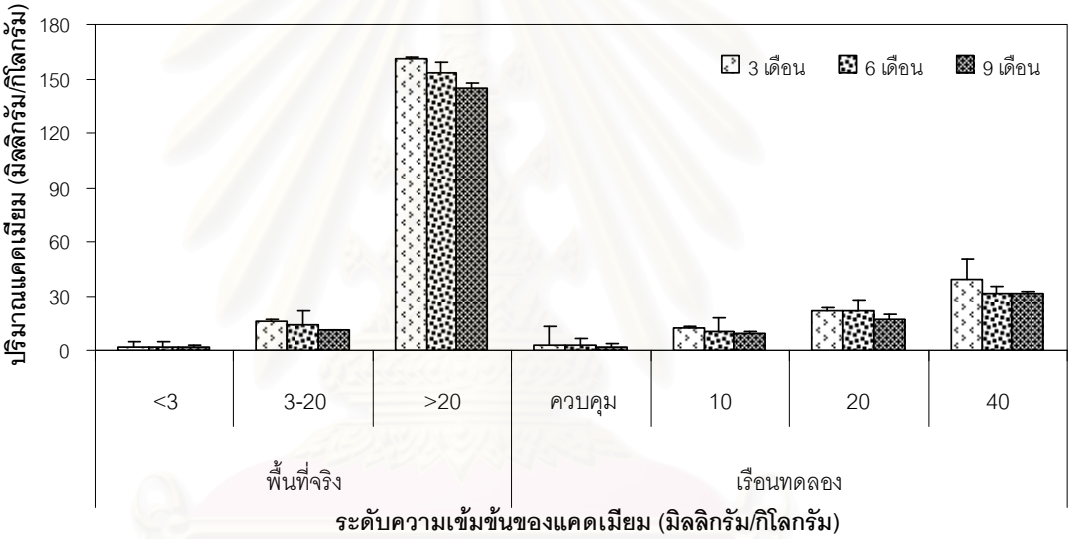
แคดเมียมที่ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งเป็นช่วงของระดับการปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่จริงที่มากกว่า 20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งภายหลังจากนำตัวอย่างดินมาทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด และคุณสมบัติเบื้องต้นของดินแล้ว พบว่า ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดมีการสะสมในดินอยู่ในระดับที่สูงมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งจากการทดลองในเรือนทดลอง ได้เลือกศึกษาที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ทั้งนี้เนื่องจากอยู่ในระดับที่เกินจากค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมเล็กน้อย ที่ได้กำหนดไว้ไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามประกาศของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 พ.ศ. 2547 นอกจากนี้หากมีการใส่สารประกอบแคดเมียมในเตรทในปริมาณที่มากกว่านี้ อาจเป็นอันตรายต่ออ้อย และสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ได้ ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ จึงเลือกศึกษาที่ระดับความเข้มข้นดังกล่าว คือ ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน

สำหรับระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างดิน และอ้อยทั้งจากพื้นที่จริง และจากเรือนทดลอง ได้เลือกระยะเวลาของการศึกษา โดยแบ่งออกเป็น 3 ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างด้วยกัน คือ 1) การเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 3 เดือน ซึ่งเป็นช่วงที่อ้อยมีวิวัฒนาการตั้งแต่ระยะงอก (Germination Phase) จนถึงระยะแตกกอ (Tillering Phase) 2) การเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 6 เดือน เป็นช่วงระยะย่างปล้อง (Stalk Elongation Phase) ของต้นอ้อย ซึ่งเป็นระยะที่อ้อยมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว มีการสร้างปล้อง และเริ่มมีการสะสมน้ำตาล และเป็นระยะต่อเนื่องกับระยะแตกกอ และ 3) การเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 9 เดือน ซึ่งเป็นระยะสุดท้ายของการเจริญเติบโตของอ้อย เรียกว่าระยะแก่ (Maturation Phase) ในระยะนี้อ้อยมีการเจริญเติบโตช้าลง และเป็นระยะที่มีการสะสมน้ำตาลของอ้อย

4.4.1 ความสามารถของการสะสมแคดเมียมในดินที่ปนเปื้อนจากพื้นที่จริงกับเรือนทดลอง

ภายหลังจากที่ได้ทำการศึกษาครบทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างแล้ว ผลของการศึกษาความสามารถของการสะสมแคดเมียมในดิน จากการทดลองในพื้นที่จริงและในเรือนทดลอง ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.16 โดยพบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในดินของพื้นที่จริง มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาของการศึกษานานขึ้น หรือเมื่ออ้อยมีอายุเพิ่มขึ้นที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม <3 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งมีความสอดคล้องกับดินในเรือนทดลองที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในชุดควบคุม ในขณะที่ดินในพื้นที่จริงที่มีระดับความ

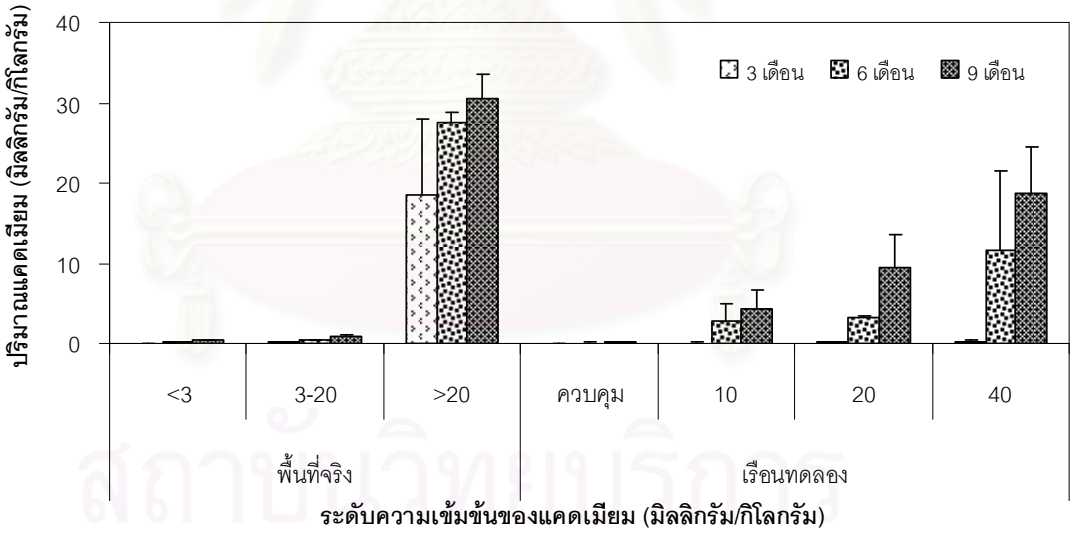
เข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 3-20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน กับดินจากเรือนทดลองที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีค่าลดลงแตกต่างกันเล็กน้อย หากแต่ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินจากพื้นที่จริง >20 และดินจากเรือนทดลองที่ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า มีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินแตกต่างกันค่อนข้างมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ปริมาณแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินเริ่มต้นจากพื้นที่จริงมีปริมาณที่มากกว่าดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมจากเรือนทดลองประมาณ 4 เท่า อย่างไรก็ตาม ค่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในดิน มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกันเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.16 ความสามารถของการดูดดึงแคดเมียมทั้งหมดในดินที่ปนเปื้อนจากพื้นที่จริงกับเรือนทดลอง

ในทางตรงกันข้ามกับปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่า ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง หรือตามอายุของอ้อยที่เพิ่มขึ้นในทุกๆ ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน ทั้งในพื้นที่จริงและในเรือนทดลอง โดยเฉพาะที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน พบปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้มากที่สุด อย่างไรก็ตามการที่มีปริมาณแคดเมียมสะสมเพิ่มสูงขึ้นนี้ อาจเนื่องมาจากผลของการใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-8 จำนวน 2

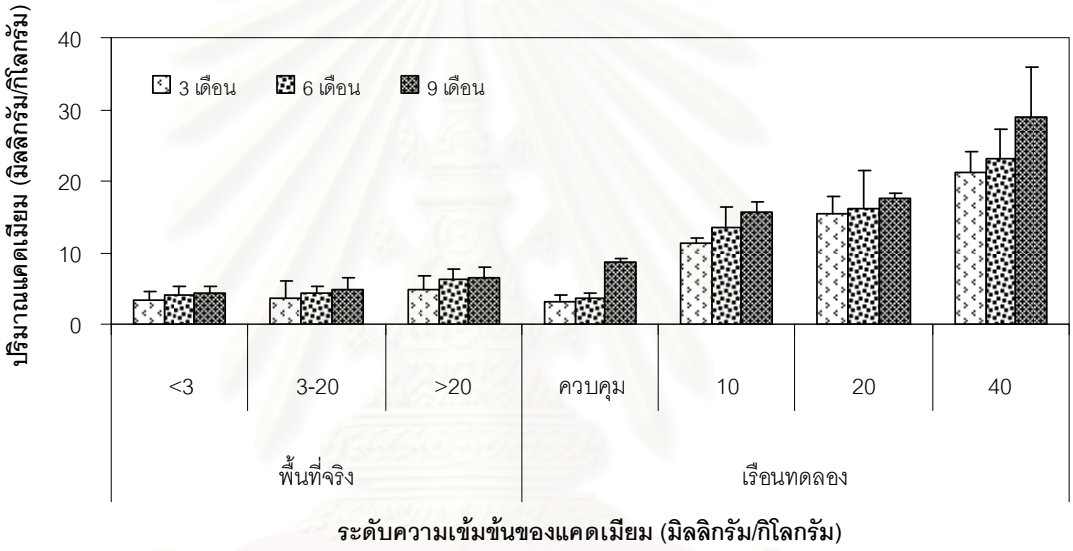
ครั้ง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Williams และ David (1973) ที่ได้ทำการศึกษา ผลของปุ๋ยซุปเปอร์ฟอสเฟต (Superphosphate) ต่อปริมาณแคดเมียมในดินและพืช พบว่า ปริมาณแคดเมียมในการผลิตปุ๋ยฟอสเฟตของรัฐนิวเซาท์เวลส์ ประเทศออสเตรเลียอยู่ในช่วง 18-91 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยปุ๋ยซุปเปอร์ฟอสเฟตมีปริมาณแคดเมียมอยู่เท่ากับ 38-48 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งพืชสามารถดูดดึงแคดเมียมไปได้ในรูปของแคดเมียมคลอไรด์ ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าการใส่ปุ๋ย อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้มีการสะสมแคดเมียมในพืชได้ นอกจากนี้ Tu, Zheng และ Chen (2000) ได้ทำการศึกษาผลของปุ๋ยเคมี (NPK) ที่มีต่อรูปแบบของโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว และแคดเมียมในดิน พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมีลงไปในดินอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบ (Speciation) และการใช้ประโยชน์ได้ในสิ่งมีชีวิต (Bioavailability) ของโลหะหนัก ดังนั้นอิทธิพลของการใส่ปุ๋ยทำให้ปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลานานขึ้น นอกจากนี้ มีรายงานว่าปุ๋ยที่มีปริมาณแอมโมเนีย (NH_4) สูง สามารถลดความเป็นกรดเป็นด่างในดินได้ ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมของพืชเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Willaert และ Verloo, 1992)



รูปที่ 4.17 ความสามารถของการดูดดึงแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ที่ปนเปื้อนจากพื้นที่จริงกับเรือนทดลอง

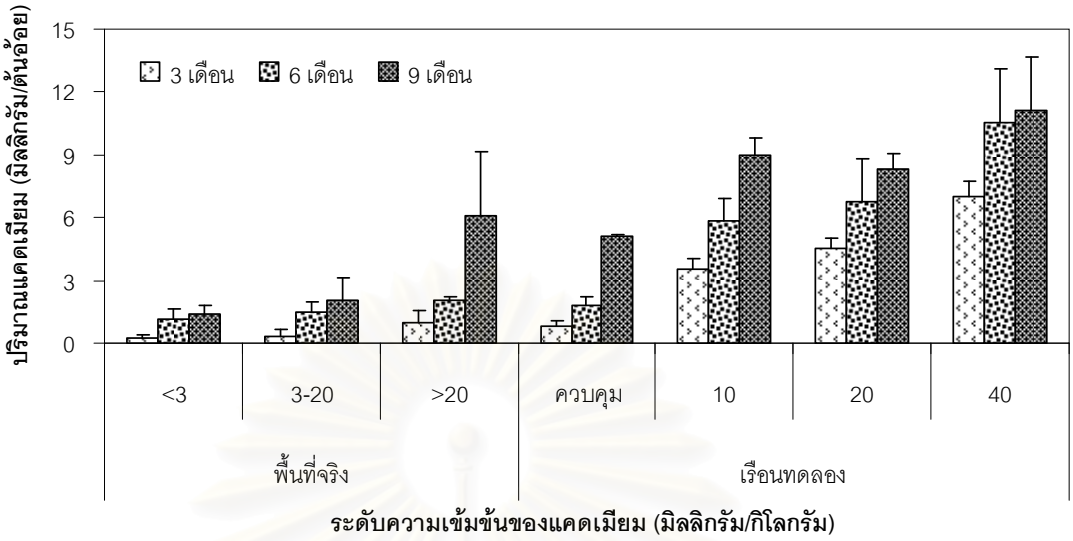
4.4.2 ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยจากพื้นที่จริงกับเรือนทดลอง

ผลการศึกษาครั้งนี้ ทำให้ทราบปริมาณการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อย ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.18 และ 4.19 พบว่า ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมด้วยทุกส่วนของอ้อยจากพื้นที่จริงมีความสอดคล้องกับในเรือนทดลอง โดยอ้อยมีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมเพิ่มขึ้นทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน และเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมสูงที่สุด



รูปที่ 4.18 ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมในดินที่ปนเปื้อนโดยอ้อยต่อกิโลกรัมจากพื้นที่จริงกับเรือนทดลอง

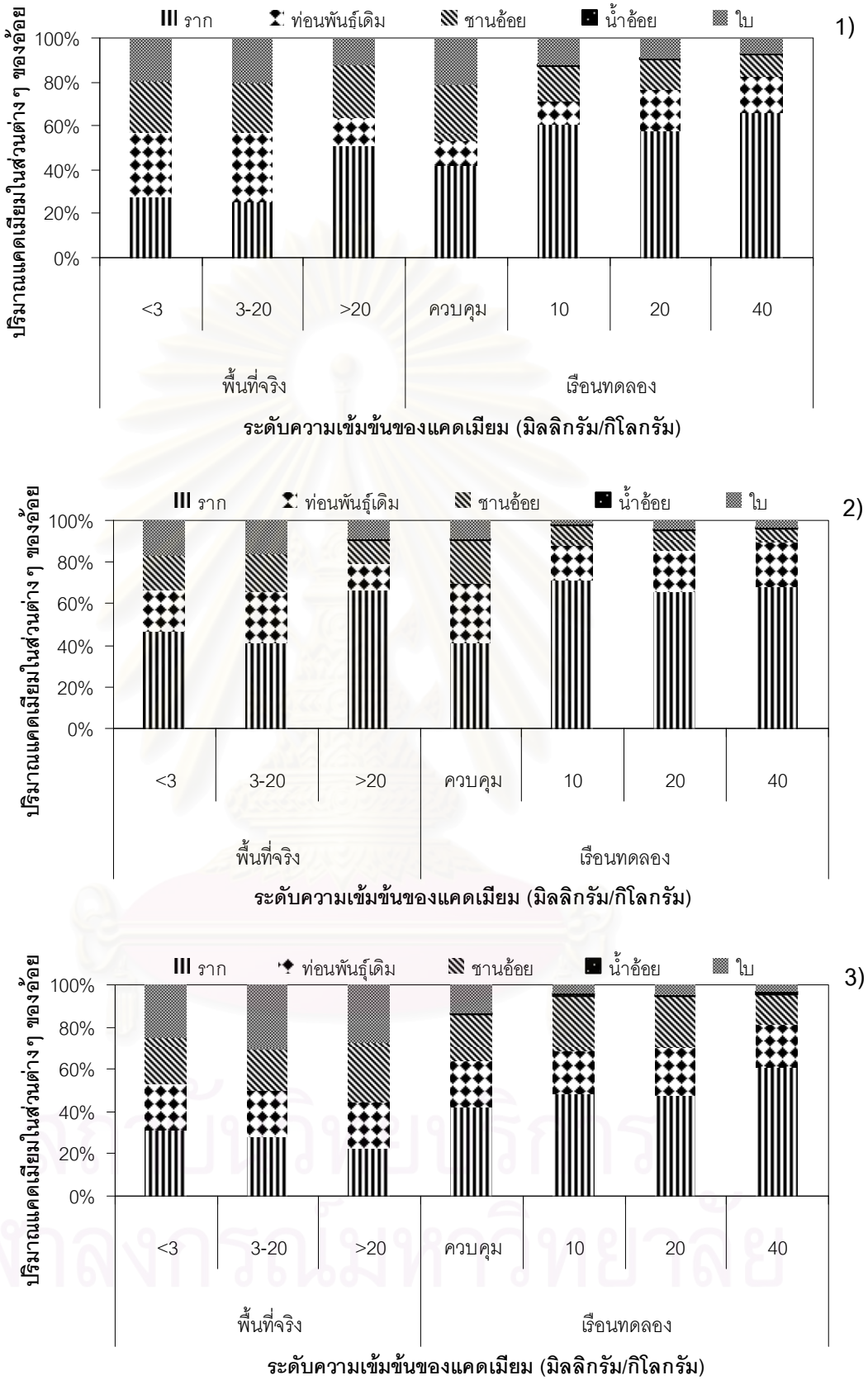
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.19 ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมในดินที่ปนเปื้อนโดยอ้อยต่อต้นจากพื้นที่จริงกับเรือนทดลอง

นอกจากได้ทำการศึกษาปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในอ้อยทั้งต้นแล้ว ยังได้มีการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย 5 ส่วน คือ ราก ท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย น้ำอ้อย และใบ โดยได้แบ่งระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อยออกเป็น 3 ครั้ง เช่นเดียวกับการเก็บตัวอย่างดิน ดังแสดงรายละเอียดได้ในรูปที่ 4.20 ซึ่งจากการรายงานของ Adriano (2001: 268) ที่มีการศึกษาพืชพรรณในระบบสิ่งแวดล้อมป่า ที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมจากการกระทำของมนุษย์ พบว่า มีการสะสมของแคดเมียมในราก (Roots) > ใบพืช (Foliage) > กิ่งก้าน (Branch) > ลำต้น (Bole) ตามลำดับ โดยมีความสอดคล้องกับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งเหตุผลหนึ่งที่มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนรากมากว่าส่วนอื่นๆ อาจมาจากส่วนรากเป็นส่วนที่มีการสัมผัสกับจุลธาตุหรือธาตุอาหารต่างๆ ได้ดี ประกอบกับแคดเมียมเป็นธาตุที่เคลื่อนที่ได้เพียงเล็กน้อย จึงทำให้มีปริมาณการสะสมแคดเมียมไว้ที่ส่วนรากมากกว่าส่วนอื่นๆ ของอ้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.20 ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อยจากพื้นที่จริงกับเรือนทดลอง ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 1) 3 เดือน 2) 6 เดือน และ 3) 9 เดือน

จากรูปที่ 4.20 สามารถอธิบายผลของการศึกษาได้โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเด็นหลัก คือ 1) ผลของระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อยต่อปริมาณการดูดึงแคดเมียมในส่วนต่างๆ อ้อย และ 2) ผลของระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่ปนเปื้อนต่อปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อยทั้งจากพื้นที่จริง และเรือนทดลอง ซึ่งสามารถอธิบายในรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

1) ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อยต่อปริมาณการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อย

จากผลของการศึกษาในครั้งนี้ ทำให้ทราบถึงแนวโน้มของการดูดดึงแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย ได้ดังนี้

การสะสมแคดเมียมในส่วนรากอ้อย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 6 เดือน และลดลงเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน ซึ่งมีความสอดคล้องกันทั้งในพื้นที่จริง และในเรือนทดลอง สาเหตุนี้ อาจเนื่องมาจากในระยะเวลา 6 เดือน เป็นระยะย่างปล้อง (Grand Growth Phase) ของอ้อย ซึ่งระยะนี้จะมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยอ้อยได้รับน้ำความชื้น และธาตุอาหารในดินจากราก ซึ่งในระยะนี้เป็นช่วงที่รากชุดเดิม หรือที่เรียกว่า รากของท่อนพันธุ์ (Sett Root) ที่เจริญมาจากปุ่มรากในส่วนข้อ (Primordial Roots) ของท่อนพันธุ์เริ่มหมดสภาพ ทยอยตายไป และมีการทดแทนหรือแทนที่โดยรากของหน่อ (Shoot Root) ซึ่งเป็นรากที่สมบูรณ์ และมีขนาดใหญ่กว่ารากของท่อนพันธุ์เดิม จึงทำให้รากของอ้อยมีการดูดดึงแคดเมียมได้มากขึ้น (พีรศักดิ์ วรสุนทโรสถ และคณะ, 2544; สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2540a) หลังจากนั้น ในระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน พบว่า อัตราการเจริญเติบโตเริ่มช้าลง จึงทำให้การดูดดึงธาตุอาหารทางรากก็ย่อมลดลงด้วย เหลือเพียงการสร้างน้ำตาลที่ได้จากการสังเคราะห์แสงทางใบมาสะสมไว้ภายในลำต้นเท่านั้น ซึ่งมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนรากมากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่นๆ ของอ้อย โดยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศศิธร ใฝ่สัจธรรม (2549) ที่ได้ทำการศึกษาการสะสมแคดเมียมของหญ้าแฝกลุ่ม และหญ้าแฝกดอนจากดิน ซึ่งพบว่า หญ้าแฝกทั้งสองกลุ่มพันธุ์มีการสะสมแคดเมียมไว้ที่ส่วนรากมากกว่าส่วนใบ และลำต้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Segura และคณะ (2006) ที่ได้ทำการศึกษาการสะสมโลหะในอ้อยที่ปลูกในดินบริเวณที่มีการฝังกลบขยะชุมชน พบว่า อ้อยสามารถสะสมแคดเมียมไว้ที่รากมากกว่าลำต้น และใบ โดยมีค่าเท่ากับ 0.23, 0.20 และ 0.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

สำหรับการสะสมแคดเมียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิม เป็นส่วนที่อยู่ตั้งแต่ใต้ดินลงไปนั้น จัดได้ว่าเป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างรากกับลำต้นของอ้อย ซึ่งผลของการศึกษา พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมมีค่าไม่แตกต่างกันมากในแต่ละระดับความเข้มข้น และระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง ซึ่งมีปริมาณการดูดดึงแคดเมียมมากที่สุดที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3 เดือนจากในพื้นที่จริง ในขณะที่ในเรือนทดลอง พบว่า ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมมีมากที่สุดที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 เดือน เหตุผลที่ทั้งสองพื้นที่ศึกษา มีแนวโน้มของการดูดดึงแคดเมียมที่แตกต่างกัน อาจเนื่องมาจาก การเก็บตัวอย่างของท่อนพันธุ์เดิมมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ ตัวอย่างท่อนพันธุ์เดิมที่เก็บในพื้นที่จริง เป็นส่วนที่อยู่ตั้งแต่ใต้ดินลงไป แต่ไม่ได้รวมถึงท่อนพันธุ์ที่ใช้สำหรับปลูก เพราะท่อนพันธุ์ที่ใช้ปลูกของเกษตรกร ใช้ทั้งลำต้น โดยวางเหลื่อมกันระหว่างส่วนยอดของลำที่ 1 กับส่วนโคนของลำที่ 2 และตัดลำอ้อยออกเป็นท่อนให้แยกจากกัน (สมคิด แจ่มจำรัส, 2549) จึงไม่ได้นำส่วนท่อนพันธุ์มาทำการวิเคราะห์ผลด้วย ทำให้ผลที่ได้มีแนวโน้มแตกต่างกับผลในเรือนทดลอง อย่างไรก็ตาม การสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมจากพื้นที่จริงสามารถอธิบายผลได้ดังนี้ ในระยะแรกของการปลูก หรือที่เรียกว่า ระยะงอก (Germination Phase) ซึ่งเป็นระยะตั้งแต่การปลูกจนกระทั้งหน่อโผล่พ้นดิน รากของท่อนพันธุ์ได้ทำหน้าที่ในการดูดน้ำ และธาตุอาหารให้อ้อยมีการเจริญเติบโตขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปรากของหน่อได้เกิดขึ้นมาแทน หลังจากนั้น รากของท่อนพันธุ์ รวมถึงตัวท่อนพันธุ์จึงหมดสภาพลงในช่วงเวลาการปลูกประมาณ 6 เดือน สำหรับในเรือนทดลองมีเหตุผลเช่นเดียวกับการสะสมแคดเมียมในรากอ้อย ดังนั้น สามารถกล่าวได้ว่าเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างนานขึ้นมีผลทำให้ปริมาณการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิมลดลง

การสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้น (ชานอ้อย) และใบอ้อย เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของการสะสมแคดเมียมแล้ว พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนชานอ้อย และใบอ้อย ทั้งจากพื้นที่จริงและในเรือนทดลอง มีความสอดคล้องกัน กล่าวคือ ในระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 3 เดือน มีการสะสมแคดเมียมสูงขึ้นในทุกระดับความเข้มข้น และลดลงเมื่อระยะเวลา 6 เดือน หลังจากนั้นที่ระยะเวลา 9 เดือน พบว่า ชานอ้อย และใบอ้อย มีแนวโน้มในการสะสมแคดเมียมเพิ่มสูงขึ้น โดยเหตุผลที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจาก ในระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3 เดือน เป็นระยะเวลาที่อ้อยมีการเจริญเติบโต ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดใบ การแตกกอ และการเจริญเติบโตของลำปล้อง อันเป็นช่วงเวลาของการเกิดใบอย่างต่อเนื่อง ที่เรียกว่า Plastochrone (พีรศักดิ์ วรสุนทโรสถ และคณะ, 2544) อย่างไรก็ตาม ในต้นอ้อย 1 ต้นจะมีใบประมาณ 10 ใบ แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับพันธุ์และปัจจัยการเจริญเติบโตอื่นๆ ด้วย นอกจากนี้ ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน พบว่า มีการสะสมแคดเมียมเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากเป็นระยะที่มีอัตราการเจริญเติบโต

ช้าลง เมื่อเทียบกับช่วงอายุของอ้อยอื่นๆ ทำให้น้ำตาลที่ใบสร้างขึ้นจากการสังเคราะห์แสงถูกใช้ในการเจริญเติบโตน้อยลง และไปสะสมอยู่ในลำต้นมากขึ้น (Vered และ Rao, 2007) ดังนั้นด้วยเหตุผลนี้ อาจทำให้ธาตุอาหาร รวมทั้งจุลธาตุต่างๆ ถูกสะสมอยู่ในส่วนของลำต้นและใบมากขึ้นด้วย สำหรับการลดลงของแคดเมียมในส่วนใบ และชานอ้อย ที่ระยะเวลา 6 เดือน อาจเกิดมาจากช่วงเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อยครั้งที่ 2 (วันที่ 11 กรกฎาคม 2550) เป็นช่วงฤดูฝน ทำให้ปริมาณแสงแดดที่อ้อยได้รับสำหรับใช้ในการสังเคราะห์แสงของใบอ้อยลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ramanujam และ Venkataramana (1999) ที่ได้มีการศึกษาช่วงของแสงที่มีอิทธิพลต่อการสะสมชีวมวลในอ้อย โดยพบว่า การเจริญเติบโตของลำต้นอ้อยเพิ่มขึ้นเมื่อต้นอ้อยได้รับแสงแดดอยู่ในช่วง 10-14 ชั่วโมงต่อวัน โดยการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ใบเป็นไปอย่างรวดเร็วที่ระยะเวลา 3-5 เดือน จนถึงช่วงแรกของระยะย่างปล้อง จึงเป็นเหตุผลให้น้ำตาลที่ใบสร้างขึ้นถูกนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตของอ้อย ดังนั้น จึงทำให้ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบอ้อยลดลง

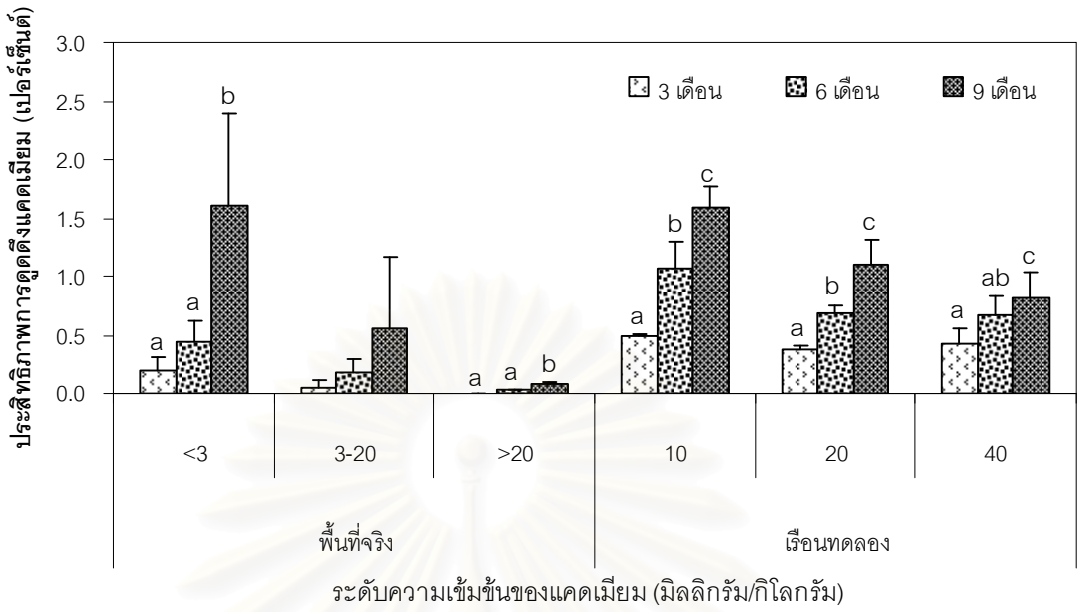
ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อย พบว่า น้ำอ้อยมีความสามารถในการสะสมแคดเมียมได้ แต่มีในปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนอื่นๆ ของอ้อย โดยพบการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างนานขึ้น ทั้งในอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริง และอ้อยที่ปลูกจากเรือนทดลอง

2) ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินต่อปริมาณการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อย

จากผลการศึกษา ได้นำมาพิจารณาถึงระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย จากพื้นที่จริงที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน รวมถึงระดับความเข้มข้นของแคดเมียมจากเรือนทดลองที่มีระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินชุดควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน โดยพบว่า ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมในดิน ทั้งการทดลองจากพื้นที่จริง และเรือนทดลองในทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย

4.5 ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริงและเรือนทดลอง

การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยที่ปลูกในพื้นที่จริง และในเรือนทดลอง ทำให้ทราบถึงความสามารถของอ้อยที่ช่วยลดปริมาณแคดเมียมที่มีการปนเปื้อนอยู่ในดินได้ โดยในการหาประสิทธิภาพนี้ ได้คำนวณจากเปอร์เซ็นต์ของปริมาณการสะสมแคดเมียมในต้นอ้อยทุกส่วนต่อปริมาณแคดเมียมทั้งหมดที่อยู่ในดิน ซึ่งผลการศึกษาได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.21 กล่าวคือ ประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมในดินที่ปนเปื้อนโดยอ้อยที่ศึกษาในพื้นที่จริงที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่าอ้อยมีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมในดินมากที่สุดที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน ในทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน เช่นเดียวกันกับ อ้อยที่ปลูกจากเรือนทดลอง ที่มีระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน โดยประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อยจากพื้นที่จริง ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน มีค่าเท่ากับ 1.60, 0.55 และ 0.08 เปอร์เซ็นต์ ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมในดินจากเรือนทดลอง มีค่าเท่ากับ 1.58, 1.10 และ 0.81 เปอร์เซ็นต์ ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ประสิทธิภาพของการดูดดึงแคดเมียมในดินโดยอ้อยมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น และเมื่อนำประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยมาคำนวณทางสถิติ พบว่า ประสิทธิภาพของการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยจากพื้นที่จริงที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 3-20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หากแต่ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินจากพื้นที่จริง <3 และ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน และระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินจากเรือนทดลอง ในทุกๆ ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินได้แก่ 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ประสิทธิภาพของการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อย มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร a, b, ab และ c) เมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อย ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษ บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาถึงระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน ต่อประสิทธิภาพของการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยจากพื้นที่จริงและเรือนทดลอง ดังตารางที่ 4.26 พบว่า ประสิทธิภาพของการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยจากพื้นที่จริงมีแนวโน้มลดลง ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน และมีความสอดคล้องเช่นเดียวกันกับประสิทธิภาพของการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยจากในเรือนทดลอง โดยประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมมากที่สุดของอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริงที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน <3 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดินมีค่าเท่ากับ 0.19, 0.45 และ 1.60 เปอร์เซ็นต์ ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมในดินจากเรือนทดลองมีค่ามากที่สุด ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 10 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน โดยมีค่าเท่ากับ 0.50, 1.07 และ 1.58 เปอร์เซ็นต์ ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อยที่ 3, 6 และ 9 เดือน ตามลำดับ และเมื่อนำผลการศึกษามาทดสอบทางสถิติ พบว่า ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยจากพื้นที่จริง ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน <3 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน สำหรับ

ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยจากเรือนทดลอง ในแต่ละระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (กลุ่มอักษร a และ b) ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 และ 9 เดือน นอกจากนี้ ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 10 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า มีความแตกต่างกันจากระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน หากแต่ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3 เดือน พบว่า ทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.26 ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน (เปอร์เซ็นต์) (n=3)

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง (เดือน)		
	3	6	9
<3	0.19^{b}±0.12	0.45^{b}±0.18	1.60^{b}±0.80
3-20	0.05^{ab}±0.06	0.18^{a}±0.11	0.55^{ab}±0.62
>20	0.01^{a}±0.00	0.03^{a}±0.01	0.08^{a}±0.03
10	0.50±0.01	1.07^{b}±0.22	1.58^{b}±0.18
20	0.37±0.69	0.69^{a}±0.08	1.10^{a}±0.22
40	0.43±0.67	0.67^{a}±0.16	0.81^{a}±0.22

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ภาคผนวก ง)

จากผลการทดลองหาประสิทธิภาพของการดูดดึงแคดเมียมออกจากดินโดยอ้อย ที่ปลูกในเรือนทดลอง ทำให้ทราบถึงความสามารถของอ้อยต่อต้นในการกำจัดแคดเมียม หากแต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยจากพื้นที่จริง ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 3-20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน (จากตารางที่ 4.1 มีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินเท่ากับ 16.66 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และจากเรือนทดลองที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 10 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมในดินโดยอ้อยจากพื้นที่จริง และจากเรือนทดลองมีค่าเท่ากับ 0.55 และ 1.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน

ในการศึกษาของนักวิจัยหลายท่าน ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสะสมแคดเมียมในส่วนของพืชนั้น อาจกล่าวได้ว่าชนิดของพืช สายพันธุ์ และเนื้อเยื่อของพืช มีความสามารถในการสะสมแคดเมียมได้แตกต่างกัน โดยการกระจายตัวของแคดเมียมไปสะสมยังส่วนต่างๆ ของพืช ระหว่างส่วนราก และส่วนยอดมีความแตกต่างกัน ซึ่งโดยทั่วไปพบว่า ส่วนรากมีการสะสมแคดเมียมได้มากกว่าส่วนยอด แต่ก็ไม่เป็นเช่นนั้นเสมอไป ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับชนิดของพืช (Plant Species) วัสดุปลูก (Rooting Medium) และระยะเวลาในการศึกษา (Time of Treatment) ยกตัวอย่างเช่น ส่วนยอดของหัวไชเท้า (Radish Shoots) มีความสามารถในการสะสมแคดเมียมได้ 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อปลูกในดินที่มีระดับการปนเปื้อนของแคดเมียม 0.6 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน นอกจากนี้ ผลการศึกษาของ ศศิธร ไฝสัจธรรม (2549) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหญ้าแฝกลุ่ม และหญ้าแฝกดอนในการดูดดึงแคดเมียมจากดิน ซึ่งพบว่า หญ้าแฝกลุ่มของกลุ่มพันธุ์สุราษฎ์ธานี มีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมสูงกว่ากลุ่มพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งเป็นกลุ่มพันธุ์ของหญ้าแฝกดอน โดยมีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมของหญ้าแฝกกลุ่มพันธุ์สุราษฎ์ธานีสูงสุดที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และที่ระยะเวลา 90 วัน คิดเป็นร้อยละ 4.63 และกลุ่มพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ คิดเป็นร้อยละ 4.10 ซึ่งจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยมีเปอร์เซ็นต์ต่ำกว่าประสิทธิภาพของการดูดดึงแคดเมียมในหญ้าแฝก สำหรับพืชประเภทใบ เช่น ผักกาดหอม (Lettuce) ผักขม (Spinach) และหัวผักกาดเขียว (Turnip Greens) พบว่า มีการสะสมแคดเมียมอยู่ในช่วง 175-354 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อปลูกในดินที่มีการเติมกากตะกอนน้ำเสียโดยมีปริมาณแคดเมียมมากกว่า 640 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้พืชประเภทที่มีผล และเมล็ดที่ได้นำมาศึกษา พบว่า โดยปกติมีการสะสมแคดเมียมไม่เกิน 10-15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ความเข้มข้นของแคดเมียมในวัสดุปลูก อุณหภูมิ และความเข้มแสง ก็เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของโลหะได้เช่นกัน (Adriano, 2001: 281)

ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมในดินโดยอ้อย ทำให้ทราบว่า อ้อยไม่ใช่พืชที่เป็น Hyperaccumulator หรือไม่เป็นพืชที่สามารถสะสมแคดเมียมไว้ได้ในปริมาณสูง เนื่องจาก มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยน้อยกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งพืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะได้ในปริมาณสูง โดยปกติมักเป็นพืชที่มีชีวมวล (Biomass) ต่ำ เพราะพืชต้องใช้พลังงานมากในกลไลของการปรับตัวของเนื้อเยื่อ เมื่อได้รับความเข้มข้นของโลหะในปริมาณที่สูง (Kabata-Pendias และ Pendias, 2000: 73-74)

4.6 **สมดุลมวล** (Mass Balance) **ของการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในเรือนทดลอง**

ในการทำสมดุลมวลนี้ เพื่อเป็นการศึกษาปริมาณแคดเมียมที่มีอยู่ในระบบ โดยทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในดินทั้งหมด และปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในอ้อย และได้แยกปริมาณการสะสมแคดเมียมออกเป็นส่วนต่างๆ ของอ้อย เพื่อให้เห็นเปอร์เซ็นต์ของการสะสมที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งในการทำสมดุลมวลนี้ได้ทำเฉพาะในเรือนทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากในพื้นที่จริงไม่สามารถควบคุมทั้งระบบได้ ผลการศึกษาดังกล่าว ได้ทดลองที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน และทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 3, 6 และ 9 เดือน ดังได้แสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 4.27 ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้พบว่า ผลรวมของปริมาณแคดเมียมทั้งระบบ มีไม่ครบ 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาณแคดเมียมบางส่วนที่หายไปนั้น อาจติดอยู่กับภาชนะปลูกหรือพลาสติกหุ้มถุง และวัสดุปลูกที่ใช้ในการทดลอง จึงทำให้ปริมาณแคดเมียมบางส่วนหายไปจากระบบ ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณแคดเมียมที่สูญหายไปจากระบบโดยเฉลี่ยทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียม และทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 12.81 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.27 สมดุลมวลของการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยในเรือนทดลอง

ความเข้มแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ระยะเวลา (เดือน)	ปริมาณแคดเมียม (มิลลิกรัม)						ปริมาณแคดเมียม (เปอร์เซ็นต์)						ผลรวมปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในระบบ (เปอร์เซ็นต์)
		ดิน	อ้อย					ดิน	อ้อย					
			ราก	ท่อนพันธุ์เดิม	ชาน	น้ำอ้อย	ใบ		ราก	ท่อนพันธุ์เดิม	ชาน	น้ำอ้อย	ใบ	
ควบคุม	3	127.10	0.17	0.03	0.16	0.00	0.25	95.89	0.13	0.02	0.12	0.00	0.19	96.35
	6	124.40	0.24	0.16	0.64	0.03	0.11	93.85	0.18	0.12	0.49	0.02	0.08	94.74
	9	112.45	0.37	0.12	0.83	0.10	0.16	84.84	0.28	0.09	0.62	0.08	0.12	86.03
10	3	626.35	1.33	0.19	0.79	0.13	0.87	99.02	0.21	0.03	0.13	0.02	0.14	99.55
	6	505.25	2.61	0.45	1.75	0.24	0.14	79.88	0.41	0.07	0.28	0.04	0.02	80.70
	9	502.00	1.85	0.48	4.90	0.46	0.22	79.36	0.29	0.08	0.78	0.07	0.03	80.61
20	3	1,118.70	1.74	0.40	0.89	0.23	0.86	98.78	0.15	0.04	0.08	0.02	0.08	99.15
	6	1,092.75	3.68	0.67	2.24	0.42	0.32	96.49	0.32	0.06	0.20	0.04	0.03	97.14
	9	809.15	1.96	0.68	5.40	0.51	0.30	71.45	0.17	0.06	0.48	0.04	0.03	72.23
40	3	1,950.55	3.35	0.62	1.04	0.29	1.22	91.47	0.16	0.03	0.05	0.01	0.06	91.78
	6	1,584.90	5.90	1.17	2.48	0.70	0.47	74.32	0.28	0.05	0.12	0.03	0.02	74.82
	9	1,548.30	4.97	1.22	5.18	0.73	0.45	72.60	0.23	0.06	0.24	0.03	0.02	73.18

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การศึกษาในพื้นที่จริงของอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และ 2) การศึกษาในเรือนทดลองของอำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี โดยทำการศึกษาความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมออกจากดินที่ปนเปื้อนโดยอ้อย และศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อนอยู่ในดินจากพื้นที่จริง ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน และจากเรือนทดลองที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินชุดควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน และตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 3, 6 และ 9 เดือน ซึ่งสามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริงของอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

1) คุณสมบัติ และองค์ประกอบเบื้องต้นของดิน มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วน ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินอยู่ในช่วง pH 6-7 มีสภาพเป็นกลางถึงกรดอ่อน จึงมีความเหมาะสมในการเจริญเติบโตของอ้อย สำหรับปริมาณแคดเมียมในดินจากพื้นที่จริงมีระดับการปนเปื้อนของแคดเมียม <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีค่าเท่ากับ 2.57, 16.66 และ 174.51 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ

2) ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total Cadmium) ในดินมีแนวโน้มลดลงจากปริมาณเริ่มต้นในทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน และทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง

3) แคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ (Bioavailability) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นทั้ง 3 ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมได้แก่ <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน และทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 3, 6 และ 9 เดือน

4) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ในดิน 3 พื้นที่ศึกษา มีค่าอยู่ในช่วง pH 6.05-7.53 ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 เดือน มีค่าลดลงเล็กน้อย

5) ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยทั้งต้น และในส่วนต่างๆ ของอ้อย พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกส่วน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่

ปนเปื้อนในดิน และตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง สำหรับการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย พบว่า รากอ้อย และท่อนพันธุ์เดิม มีแนวโน้มในการดูดดึงแคดเมียมเพิ่มขึ้นในระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 เดือน และลดลงที่ระยะเวลา 9 เดือน ซึ่งแตกต่างจากปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อย และใบอ้อย ที่มีแนวโน้มลดลงในเดือนที่ 6 และเพิ่มสูงขึ้นในเดือนที่ 9 สำหรับการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อย โดยส่วนใหญ่ไม่พบการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อย หากแต่ที่ระดับความเข้มข้น >20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบปริมาณแคดเมียมสะสมในน้ำอ้อยมีแนวโน้มสูงขึ้น และไม่พบที่ระดับความเข้มข้นอื่นๆ

5.1.2 การดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในเรือนทดลองอำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี

1) คุณสมบัติ และองค์ประกอบเบื้องต้นของดิน มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียวปนทราย และมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างเท่ากับ 4.87 ทำให้สภาพของดินค่อนข้างเป็นกรด สำหรับปริมาณแคดเมียมในดินจากเรือนทดลอง มีปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 2.65 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน

2) ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน พบว่า ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างต่างกันของระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 4 ระดับ มีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินไม่แตกต่างกัน โดยมีแนวโน้มของปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินลดลง และที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของแคดเมียมที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน มากที่สุดเท่ากับ 28.79 เปอร์เซ็นต์

3) แคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ มีแนวโน้มสูงขึ้นทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน โดยที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน มีปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้ในดินเพิ่มขึ้นจากระยะเวลาการเก็บตัวอย่างอื่นๆ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ในดิน พบว่า มีความเป็นกรดจัดมาก โดยมีค่าอยู่ในช่วง pH 4.57-5.00 โดยทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง และทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

5) การสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกส่วน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน และตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง สำหรับการศึกษาในส่วนต่างๆ ของอ้อย พบว่า รากอ้อย และท่อนพันธุ์เดิม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 เดือน และลดลงที่ระยะเวลา 9 เดือน แต่มีแนวโน้มแตกต่างจากชานอ้อย และใบอ้อย ที่มีแนวโน้มลดลงในเดือนที่ 6 และเพิ่ม

สูงขึ้นในเดือนที่ 9 โดยปริมาณการสะสมแคดเมียมในชานอ้อยสูงสุดที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 9 เดือน และมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอื่น ส่วนในใบอ้อยมีการสะสมสูงสุดที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 3 เดือน สำหรับในน้ำอ้อย พบว่า เมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น การสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน

5.1.3 ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อย ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนในพื้นที่จริงกับเรือนทดลอง

1) ความสามารถของการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในดินที่ปนเปื้อนจากพื้นที่จริง มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการศึกษานานขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับในเรือนทดลอง ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม <3 และชุดควบคุม กับที่ระดับ 3-20 และ 20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน แต่ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน >20 และ 40 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า มีปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินแตกต่างกันค่อนข้างมาก ประมาณ 4 เท่า หากแต่ปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปพืชสามารถดูดดึงได้ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง และทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน ทั้งในพื้นที่จริงและในเรือนทดลอง

2) ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยจากพื้นที่จริงกับในเรือนทดลอง มีความสอดคล้องกับความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยจากเรือนทดลอง โดยเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมเพิ่มสูงขึ้น และทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน

5.1.4 ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริง และเรือนทดลอง

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยจากพื้นที่จริง และเรือนทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยจากพื้นที่จริงที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน 3-20 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยจากเรือนทดลอง ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 10 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 9 เดือน พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.55 และ 1.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบพันธุ์อ้อยหลายๆ สายพันธุ์ ที่มีความเหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศ และสภาพอากาศในบริเวณนั้น เพื่อให้ได้พันธุ์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมสูงสุด

5.2.2 ควรมีการศึกษาต่อในขั้นตอนของการนำอ้อยมาเข้ากระบวนการผลิตเป็นเอทานอล โดยพิสูจน์ให้ทราบว่า มีการพบปริมาณแคดเมียมหลังจากผ่านกระบวนการหรือไม่ ตลอดจนศึกษากระบวนการกำจัดกากของเสียจากอ้อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เกษม สุขสถาน อุดม พูลเกษ และบัญญัติ โกมลวาจ. 2520. พันธุ์อ้อยที่ปลูกเป็นการค้าในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: ฟันนี่พับบลิชชิ่ง.

เกษมศรี ซับซ้อน. 2541. ปฐพีวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: นานาสิ่งพิมพ์.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2541. คู่มือปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คนึงนิจ นิชานนท์ และ ฉันทนา ผดุงทศ. 2548. การจัดการปัญหาผลกระทบต่อสุขภาพจากสิ่งแวดล้อม: กรณีแคดเมียมที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. วารสารการส่งเสริมสุขภาพและอนามัยสิ่งแวดล้อม 23 (3): 39-46.

ควบคุมมลพิษ, กรม. 2541. แคดเมี่ยม (Cadmium). จุลสาร. กรุงเทพมหานคร.

ชิดชนก อัศวโภคี. 2550. ผลของตัวคีเลตต่อการสะสมแคดเมียมของทานตะวัน *Helianthus annuus* Linn. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ณัฐพร กะการดี. 2543. อิทธิพลของการทิ้งช่วงเวลาในการเติมกากตะกอนน้ำเสียชุมชนครั้งที่สองต่อการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในดิน และผักคะน้า. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประยุทธ สมบูรณ์. 2542. การแพร่กระจายของแคดเมียมและสังกะสีในดินจากกิจกรรมเหมืองแร่สังกะสี: กรณีศึกษา เหมืองสังกะสี อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สาขาวิทยาศาสตร์ (เทคโนโลยีการวางแผนสิ่งแวดล้อมเพื่อพัฒนาชนบท) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.

ปรีชา พราหมณีย์. 2541. การจัดการดินและการใช้ปุ๋ยในไร่อ้อย. เอกสารเผยแพร่อันดับที่ 57. กรุงเทพมหานคร: สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พีรศักดิ์ วรสุนทโรสถ สุนทร ดุริยะประพันธ์ ทักษิณ อาชวาคม สายันต์ ตันพานิช ชลธิชา นิวาส ประกฤติ ปรียานันท์ ศรสูงเนิน. 2544. ทรัพยากรพืชในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้. พิมพ์ครั้งที่ 1. 3,000 เล่ม. นนทบุรี: สหมิตรพริ้นติ้ง.

ไพบูลย์ วิวัฒน์วงศ์วนา. 2546. เคมีดิน. 500 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. เชียงใหม่: เชียงใหม่พิมพ์สวย.

มุกดา สุขสวัสดิ์. 2544. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

วิชาการเกษตร, กรม. กองปฐพีวิทยา. 2544. คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช. 500 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.

วิชาการเกษตร, กรม. 2547. อ้อย. 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. เอกสารวิชาการลำดับที่ 9/2547. กรุงเทพมหานคร: ไอเดีย สแควร์.

ศศิธร ใฝ่สัจธรรม. 2549. ประสิทธิภาพของหญ้าแฝกลุ่ม และหญ้าแฝกดอนในการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีออกจากดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิริลักษณ์ กล้าการขาย และธนูชัย กองแก้ว. 2548. การบำบัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้หญ้าแฝก[Online]. สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. แหล่งที่มา: http://www.scisoc.or.th/stt/31/sec_h/paper/stt31_H0020.pdf[12 ธันวาคม 2549]

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2545. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. 1,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย. 2550. การศึกษาปริมาณโลหะหนักในดินและอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ภาคกลาง ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. รายงานฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันอาหาร. 2549. ระเบียบสาธารณรัฐประชาชนจีน เรื่อง ปริมาณสูงสุดของสารปนเปื้อนในอาหาร. ใน ฐานข้อมูลกฎระเบียบและมาตรฐานอาหารต่างประเทศ, 1-8. กรุงเทพมหานคร.

สมคิด แจ่มจำรัส. 12 ตุลาคม 2549. หัวหน้าโครงการส่งเสริมการปลูกอ้อยเพื่อผลิตเอทานอล. สัมภาษณ์.

สาธารณสุข, กระทรวง. 2534. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 135 (พ.ศ. 2534) เรื่อง น้ำบริโภคในภาชนะบรรจุปิดสนิท (ฉบับที่ 2)[ออนไลน์]. กรุงเทพมหานคร: ปลัดกระทรวงสาธารณสุข. แหล่งที่มา: http://www.fda.moph.go.th/fda-net/html/product/food/ntfmoph/ntf135.htm[3 กุมภาพันธ์ 2551]

สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2540a. อ้อย[ออนไลน์]. กรุงเทพมหานคร: โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนโดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระ เจ้าอยู่หัว เล่มที่ 5. แหล่งที่มา: http://www.kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK5/chapter3/chap3.htm[4 กุมภาพันธ์ 2551]

สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2540b. อุปกรณ์ขยายขอบเขตของสัมผัส[ออนไลน์]. กรุงเทพมหานคร: โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนโดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เล่มที่ 2. แหล่งที่มา: http://www.kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK2/chapter6/t2-6-l4.htm[4 กุมภาพันธ์ 2551]

สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. 2550. พื้นที่ปลูกอ้อยรายจังหวัด ภาคตะวันออก ปีการผลิต 2548/49[ออนไลน์]. กรุงเทพมหานคร: พื้นที่ปลูกอ้อยภาคตะวันออกประจำปี 2549. แหล่งที่มา: http://www.ocsb.go.th/[28 กุมภาพันธ์ 2551]

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2547. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน. กรุงเทพมหานคร.

สุรภี โรจน์อารยานนท์. 2532. มลพิษสภาวะแวดล้อม. ใน สภาวะแวดล้อมของเรา, หน้า 114-115. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อนงนาฏ ศรีประโยชน์. 2549. การกระจายตัวของแคดเมียมในดินที่มีการปนเปื้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อภิรดี อิ่มเอิบ. 2534. การตรวจสอบดิน. อนุรักษ์ดินและน้ำ 7 (4): 5-27, อ้างถึงใน มุกดา สุขสวัสดิ์. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2544.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2521. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521) ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค[ออนไลน์]. กรุงเทพมหานคร: รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม. แหล่งที่มา: http://www.ptit.org/legalbase/downloads/TG0930101.pdf[3 กุมภาพันธ์ 2551]

อุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, กรม. 2547. การปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก[Online]. กรุงเทพมหานคร. แหล่งที่มา: http://www.dpim.go.th/dt/pper/000001085547312.pdf[30 พฤศจิกายน 2549]

อุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, กรม. 2549. รายงานการศึกษาวิจัยสาเหตุการปนเปื้อนแคดเมียมในดินพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. กรุงเทพมหานคร.

ภาษาอังกฤษ

Adriano, D. C. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. 2nd ed. New York: Springer.

Alloway, B. J. 1995a. Soil processes and the behavior of metals. In Alloway, B.J., Heavy Metals in Soils, pp. 11-37. London: Chapman&Hall.

Alloway, B. J. 1995b. Cadmium. In Alloway, B.J., Heavy Metals in Soils, pp. 122-151. London: Chapman&Hall.

Barzegar, A. R., and Koochekzadeh, A. 2002. Cadmium and nickel status of sugarcane plant. Agricultural Science 12 (1): 119-127.

Barzegar, A. R., Koochekzadeh, A., Xing, B., and Herbert, S. J. 2005. Concentration changes of Cd, Ni and Zn in sugarcane cultivated soils. Water, Air, and Soil Pollution 161: 97–112.

Bell, M., Barry, G., and McLaughlin, M. 2001. Managing cadmium in summer grain legumes for premium quality produce[Online]. Australia. Available from:

http://www.clw.csiro.au/publications/general2002/grain_legumes_brochure.pdf [2008, February 2]

Bradl, H. B. 2005. Heavy Metals in the Environment. 1st ed. Netherlands: Elsevier Academic Press.

Codex. 2005. Report of the 37th Session of the Codex Committee on Food Additives and Contaminants, Alinorm 05/28/12. Codex Alimentarius Commission, pp. 1-189.

Codex. 2007. Codex General Standard for Contaminants and Toxins Foods, CODEX STAN 193-1995. Codex Alimentarius Commission, pp. 1-46.

Commission Regulation. 2006. Setting Maximum Levels for Certain Contaminants in Foodstuffs, No 1881/2006. In Official Journal of the European Union, 5-24. European Union.

Cottenies, A., Kiekans, L., and Van Landschoot G. 1984. Problem of the mobility and predictability of heavy metal uptake by plants. In P. L' Hermite and H. Ott (eds.), Processing and Use of Sewage Sludge pp. 124-131. Hollan: D. Reidal.

Davis, A., Ruby, M. V., and Bergstorm, P. D. 1994. Factors controlling lead bioavailability in the Butte mining district, Montana, USA. Environmental Geochemistry and health 3: 147-157.

Escrig, I., and Morell, I. 1998. Effect of Calcium on the Soil Adsorption of Cadmium and Zinc in Some Spanish Sandy Soils. Water, Air, & Soil Pollution 105: 507-520.

Gardiner, D. T., Miller, R. W., Bandamchian, B., Azzari, A. S., and Sisson, D. R. 1995. Effect of repleated sewage sludge applications on plant accumulation of heave metals. Agriculture, Ecosystems and Environment 55: 1-6.

Grant, C. A., Bailey, L. D., McLaughlin, M. J., and Singh, B. R. 1999. Management Factors which Influence Cadmium Concentration in Crops. In McLaughlin, M. J., and Singh, B. R. (eds.), Cadmium in Soils and Plants, pp. 151-198. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Helmke, P. A. 1999. Chemistry of Cadmium in Soil Solution. In McLaughlin, M. J., and Singh, B. R. (eds.), Cadmium in Soils and Plants, pp. 39-64. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

International Cadmium Association. 2006. Cadmium[Online]. Brussels, Belgium. Available from: http://www.cadmium.org/[2008, February 5]

Jackson, M. L. 1973. Soil Chemical Analysis. 2nd ed. New Delhi: Prentice-Hall.

James, M. B. 1999. The Element Cadmium[Online]. United Kingdom. Available from: http://www.jamesmbrown.co.uk/cd_pigments/cadmium.htm[2008 February 5]

Jiang, W., Liu, D., and Hou, W. 2001. Hyperaccumulation of cadmium by roots, bulbs and shoots of garlic (*Allium sativum* L.). Bioresource Technology 76: 9-13.

Kabata-Pendias, A., and Pendias, H. 2000. Trace elements in soils and plants. 3rd ed. New York: CRC Press.

Kashem, M. A., and Singh, B. R. 2002. The effect of fertilizer addition on solubility and plant-availability of Cd, Ni and Zn in soil. Nutrient Cycling in Agroecosystems 62: 287-296.

Keeney, D. R., and Wilding, R. E. 1977. Chemical Properties of Soils. In Dinauer (ed.), Soil for Management of Organic Waste and Waters, 75-100. Soil Sci. Soc. Amer. อ้างถึงใน ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. 1,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2545.

Kirkham, M. B. 2006. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. Geoderma 137 (1-2): 19-32.

Kobabayashi, J., Morii, F., and Muramoto, S. 1974. Removal of cadmium from polluted soil with the chelating agent EDTA in trace subst. Enviromental health 8: 179.

Kohnke, H., and Franzmeier, D. P. 1995. Soil science simplified. 4th ed. USA: Waveland Press.

Liu, J., Qian, M., Cai, Q., Yang, J., and 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.

Lorenz, S. E., Hamon, R. E., McGrath, S. P., Holm, P. E., and Christensen, T. H. 1994. Application of fertilizer cation affect cadmium and zinc concentrations in soil solutions and uptake by plants. European J. Soil Sci 45: 159-165.

Lu, X., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P., and Homyok, K. 2004. Removal of cadmium and zinc by water hyacinth, *Eichhornia crassipes*. ScienceAsia 30: 93-103.

McLaughlin, M. J., Palmer, L. T., Tiller, K.G., Beech, T. W., and Smart, M. K. 1994. Increasing soil salinity causes elevated cadmium concentrations in field-frown potato tubers. Journal of Environmental Quality 23: 1013-1018.

McLaughlin, M. J., and Singh, B. R. 1999. Cadmium in Soils and Plants. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Michael, W. H. Evangelou, Daghan, H., and Schaeffer, A. 2004. The influence of humic acids on the phytoextraction of cadmium from soil. Chemosphere 57 (3): 207-213.

Murakami, M., Ae, N., and Ishikawa, S. 2007. Phytoextraction of cadmium by rice (*Oryza sativa* L.), soybean (*Glycine max* (L.) Merr.), and maize (*Zea mays* L.). Environmental Pollution 145: 96-103.

Muttamara, S., and Leong, S. M. 1997. Environmental monitoring and impact assessment of solid waste disposal site. Environ Monit Assess 48: 1-24.

National Research Center for Environmental and Hazardous Waste Management (NRC-EHWM). 2005. Cadmium Distribution and Bioavailability in Cultivated Soil and Crops in tie Vicinity of Zinc Mine in Mae Sot. Bangkok: Chulalongkorn University.

Pepper, I. L., Bezdicek, D. F., Baker, A. S., and Sims, J. M. 1983. Silage corn uptake of sludge-applied zinc and cadmium as affected by soil pH. Journal of Environmental Quality 12 (2): 270-275.

Ramanujam, T., and Venkataramana, S. 1999. Influence of Altered Source Size on Growth and Dry Mass Accumulation in Sugarcane. Indian J. Plant Physiol. 4: 10-14.

Rayment, G. E., Jeffrey, A. J., and Barry, G. A. 2002. Heavy Metals in Australian Sugarcane. Communications in Soil Science and Plant Analysis 33: 3203-3212.

Segura, S. I., Oliveira, A. da S., Nikaido, M., Trevilato, T. M. B., Bocio, A., Takayanagui, A. M. M., and Domingo, J. L. 2006. Metal levels in sugar cane (*Saccharum* spp.) samples from an area under the influence of a municipal landfill and a medical waste treatment system in Brazil. Environment International 32: 52-57.

Smolders, E., and McLaughlin, M. J. 1996. Chloride increases cadmium uptake in Swiss chard in a resin-buffered nutrient solution. Soil Sci. Soc. Am. J. 60: 1443-1447.

Steve, G. 2007. It' s Elemental Cadmium[Online]. Newport News, VA: Jefferson Lab. Available from: http://education.jlab.org/itselemental/ele048.html[2008, February 3]

Tanhan, P., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P., and Chaiyarat, R. 2007. Uptake and accumulation of cadmium, lead and zinc by Siam weed [*Chromolaena odorata* (L.) King & Robinson]. Chemosphere 68 (2): 323-329.

Traina, S. J. 1999. The Environmental Chemistry of Cadmium. In McLaughlin, M. J., and Singh, B. R. (eds.), Cadmium in Soils and Plants, pp. 11-37. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Tu, C., Zheng, C. R., and Chen, H. M. 2000. Effect of applying chemical fertilizers on forms of lead and cadmium in red soil. Chemosphere 41 (1-2): 133-138.

Tudoreanu, and Phillips, C. J. C. 2004. Modeling cadmium uptake and accumulation in plants. Advances in Agronomy84: 121–157.

Turgut, C., Katie, P. M., and Teresa, J. C. 2004. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr, and Ni from soil using *Helianthus annuus*. Environmental Pollution 131: 147-154.

USEPA. 1996. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. method 3052, Washington D.C., USA.

Vered, E., and Rao, V.P. 2007. Crop Growth Phases[Online]. Netafim' s Agriculture Department. Available from: http://www.sugarcanecrops.com/crop_growth_phases/ [2007, February 4]

Villarroel, J. R., Chang, A. C., and Amrhein, C. 1993. Cd and Zn phytoavailability of a field-stabilized sludge-treated soil Soil Sci. 155 (3): 197–205.

Wang, M., Zou, J., Duan, X., Jiang, W., and Liu, D. 2007. Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.). Bioresource Technology 98 (1): 82-88.

Welch, R. M., and Norvell, W. A. 1999. Mechanisms of Cadmium Uptake, Translocation and Deposition in Plants. In McLaughlin, M. J., and Singh, B. R. (eds.), Cadmium in Soils and Plants, pp. 125-150. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Willaert, G., and Verloo, M. 1992. Effect of various nitrogen fertilizers on the chemical and biological activity of major and trace elements in a cadmium contaminated soil. Pedologie 43: 83-91.

Williams, C. H., and David, D. J. 1973. The effect of superphosphate on the cadmium content of soils and plants. Australian Journal of Soil Research 11(1): 43 – 56.

World Health Organization. 1992. Cadmium-Environmental Aspects. Environmental Health Criteria 135. Finland.

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

Zarcinas, B. A., Pongsakul, P., McLaughlin, M. J., and Cozens, G. 2004. Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia. 2. Thailand. Environmental Geochemistry and Health 26: 359-371.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สูตรการคำนวณหาปริมาณสาร

1. การคำนวณสารประกอบแคดเมียม

กำหนดให้ น้ำหนักดินทดลอง 50 กิโลกรัมต่อภาชนะปลูก

ดังนั้น น้ำหนักสารประกอบแคดเมียมที่ต้องใช้ (กรัม) เท่ากับ

$$\frac{A \times S \times MW}{MM \times 1,000}$$

เมื่อ A คือ ความเข้มข้นของสารประกอบแคดเมียมที่ระดับต่างๆ กัน (มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน)

S คือ น้ำหนักดิน (กิโลกรัม)

MM คือ มวลอะตอมของแคดเมียม (กรัม)

MW คือ มวลโมเลกุลของสารประกอบแคดเมียมไนเตรท (กรัม) ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) เท่ากับ 308.479
เมื่อ Cd = 112.411, N = 14.007, O = 15.999, H = 1.008

2. การคำนวณหาปริมาณปุ๋ย

กำหนดให้ อัตราการเติมปุ๋ย 50 กิโลกรัมต่อไร่

ความลึกของดินบน (Top Soil) อยู่ระหว่าง 15-20 เซนติเมตร
(คำนวณความลึกของดินบนที่ 17 เซนติเมตร)

ความหนาแน่นของดิน 1.13 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

1 ไร่ เท่ากับ 1,600 ตารางเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้น จำนวนปุ๋ยที่ใช้ในการทดลอง (กิโลกรัม) เท่ากับ

$$\frac{S \times P \times 1{,}000}{(1{,}600 \times 0.17) \times 1.13 \times 100^3}$$

เมื่อ S คือ น้ำหนักดิน (กิโลกรัม)

P คือ อัตราการเติมปุ๋ย (กิโลกรัมต่อไร่)

3. การคำนวณหาปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้

กำหนดให้ S คือ น้ำหนักดิน (กรัม)

V คือ ปริมาตรน้ำยาสกัด (มิลลิลิตร)

C คือ ค่าของแคดเมียมที่วัดได้จากเครื่อง AAS (มิลลิกรัมต่อลิตร)

B คือ ค่า Blank (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ดังนั้น ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เท่ากับ

$$\frac{(C - B) \times V}{S}$$

4. การหาความหนาแน่นของน้ำอ้อย

เมื่อ W = น้ำหนักของน้ำอ้อย 1 กรัม

V = ปริมาตรของน้ำอ้อย 1 มิลลิลิตร หรือ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ดังนั้น ความหนาแน่นของน้ำอ้อย $= \frac{W}{V}$

มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

การเตรียมน้ำยาสกัด DTPA

1.1 ชั่งน้ำหนัก DTPA จำนวน 1.967 กรัม TEA จำนวน 14.92 กรัม และ $CaCl_2.2H_2O$ จำนวน 1.47 กรัม

1.2 ละลายสารเคมีทั้ง 3 ชนิด ด้วยน้ำปราศจากไอออน (De-ionized H_2O) ประมาณ 900 มิลลิลิตร

1.3 ใช้แท่งแก้วคน ให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

1.4 หลังจากนั้น ปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 6M ให้ได้ pH 7.3

1.5 ปรับปริมาตรของสารละลายให้ได้ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ความเข้มข้นของสารละลายที่เตรียมได้คือ 0.005 M DTPA 0.1 M TEA และ 0.01 M $CaCl_2$ น้ำยาสกัดนี้สามารถเก็บไว้ใช้ได้นาน

DTPA เป็นสารที่ทำให้เกิดสารเชิงซ้อน (Complex) ที่มีความเสถียร (Stable)

TEA ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (Buffer) ป้องกันการเปลี่ยนแปลงของ pH เพื่อมิให้ธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ละลายออกมาอย่างผิดปกติ

$CaCl_2$ ช่วยลดการละลายของแคดเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ในดินที่เป็นด่างจัด

หมายเหตุ

สาร DTPA ละลายน้ำได้ยาก แต่จะละลายได้ดีในสารละลาย TEA ดังนั้น ในการเตรียมน้ำยาสกัด จึงควรใส่ DTPA ลงในน้ำจำนวนเล็กน้อยเสียก่อน แล้วใส่ TEA เพื่อให้การละลายเป็นไปอย่างสมบูรณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ปริมาณแคดเมียมในดินและอ้อย

1. ปริมาณแคดเมียมในดินของอ้อยที่ปลูกในพื้นที่จริง

ตารางที่ ค1 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินที่ปลูกอ้อยจากพื้นที่จริง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
<3	2.608	2.350	2.290	2.228	1.339	1.889
	2.579		1.777		1.158	
	1.863		2.618		3.168	
3-20	16.661	15.763	10.238	13.981	14.430	11.709
	11.808		11.751		5.135	
	18.821		19.953		15.562	
>20	233.254	161.079	187.549	153.119	174.511	144.607
	141.526		141.097		145.458	
	108.458		130.712		113.853	

ตารางที่ ค2 ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้ในดินที่ปลูกอ้อยจากพื้นที่จริง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
<3	0.040	0.055	0.274	0.247	0.300	0.370
	0.074		0.224		0.430	
	0.052		0.244		0.379	
3-20	0.172	0.189	0.340	0.327	1.082	0.824
	0.134		0.286		0.960	
	0.260		0.354		0.432	
>20	29.376	18.521	26.330	27.575	33.588	30.457
	13.951		28.801		30.389	
	12.234		27.595		27.393	

2. ปริมาณแคดเมียมในอ้อยที่ปลูกในพื้นที่จริง

ตารางที่ ค3 ปริมาณแคดเมียมในต้นอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในรากอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
<3	2.212	3.446	2.760	4.116	3.472	4.325
	4.180		5.352		5.445	
	3.946		4.238		4.059	
3-20	1.073	3.518	4.924	4.420	3.227	4.864
	6.043		3.360		6.481	
	3.437		4.976		4.885	
>20	5.644	4.817	5.186	6.227	8.146	6.494
	6.267		5.512		5.912	
	2.540		7.984		5.424	

ตารางที่ ค4 ปริมาณแคดเมียมในส่วนรากอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในรากอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
<3	1.625	3.603	1.037	5.422	4.536	4.886
	4.999		7.906		5.258	
	4.184		7.324		4.863	
3-20	4.420	3.901	10.127	6.880	5.174	5.027
	3.297		5.432		4.222	
	3.986		5.083		5.686	
>20	35.586	25.227	28.148	28.353	26.944	25.277
	17.574		28.263		27.442	
	22.522		28.647		21.446	

ตารางที่ ค5 ปริมาณแคดเมียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิมที่ปลูกจากพื้นที่จริง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
<3	2.182	3.774	2.176	2.280	4.572	3.436
	4.777		2.187		2.100	
	4.362		2.475		3.637	
3-20	4.348	4.784	2.876	4.164	1.434	4.002
	6.575		4.201		4.932	
	3.430		5.414		5.639	
>20	6.164	6.131	4.852	5.377	4.257	5.090
	5.436		5.479		5.532	
	6.794		5.801		5.479	

ตารางที่ ค6 ปริมาณแคดเมียมในส่วนชานอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในชานอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
<3	2.567	3.084	2.322	1.942	2.825	3.433
	2.862		2.269		3.449	
	3.822		1.234		4.025	
3-20	3.987	3.527	5.019	3.118	2.659	3.538
	4.215		1.871		3.880	
	2.379		2.465		4.076	
>20	17.308	11.858	6.084	5.025	9.202	6.482
	6.671		4.620		5.586	
	11.597		4.372		4.659	

ตารางที่ ค7 ปริมาณแคดเมียมในส่วนน้ำอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในน้ำอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
<3	0.000 0.000 0.000	0.000	0.000 0.000 0.000	0.002
3-20	0.000 0.000 0.000	0.000	0.000 0.000 0.000	0.000
>20	0.123 0.112 0.000	0.078	0.151 0.189 0.000	0.113

หมายเหตุ ความหนาแน่นของน้ำอ้อยเท่ากับ 1.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ ค8 ปริมาณแคดเมียมในส่วนใบอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในใบอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
<3	1.531 1.869 4.061	2.487	1.524 1.472 2.883	1.960	4.505 3.473 3.917	3.965
3-20	4.143 1.491 3.509	3.048	5.498 0.848 1.545	2.630	3.864 7.095 5.460	5.473
>20	9.204 4.523 4.226	5.984	1.833 0.897 8.880	3.870	5.556 6.376 6.960	6.297

3. ปริมาณแคดเมียมในดินของอ้อยที่ปลูกในเรือนทดลอง

ตารางที่ ค9 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดินที่ปลูกอ้อยจากเรือนทดลอง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
ควบคุม	1.200	2.542	1.784	2.488	1.374	2.249
	1.433		5.681		1.581	
	4.992		0.000		3.793	
10	14.649	12.475	12.687	10.052	10.136	9.987
	12.456		8.149		9.776	
	12.318		9.320		10.149	
20	23.579	22.321	28.954	21.802	17.496	16.130
	21.601		17.347		14.854	
	21.783		19.104		16.040	
40	34.417	38.958	33.919	31.645	33.791	30.913
	45.147		33.915		29.122	
	37.311		27.102		29.826	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค10 ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดดึงได้ในดินที่ปลูกอ้อยจากเรือนทดลอง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
ควบคุม	0.056	0.080	0.102	0.106	0.141	0.168
	0.076		0.088		0.162	
	0.108		0.128		0.202	
10	0.127	0.093	4.552	2.704	6.816	4.198
	0.079		3.495		1.896	
	0.072		0.065		3.881	
20	0.177	0.109	3.396	3.152	13.184	9.483
	0.017		3.040		5.007	
	0.132		3.019		10.257	
40	0.347	0.222	18.392	11.540	12.418	18.694
	0.139		16.135		23.746	
	0.181		0.091		19.919	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. ปริมาณแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของอ้อยที่ปลูกในเรือนทดลอง

ตารางที่ ค11 ปริมาณแคดเมียมในต้นอ้อยที่ปลูกจากเรือนทดลอง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
ควบคุม	1.902	3.049	4.445	3.613	8.120	8.663
	3.621		3.367		8.765	
	3.625		3.026		9.105	
10	10.667	11.351	13.147	13.414	15.760	15.648
	11.652		10.527		14.235	
	11.734		16.569		16.948	
20	15.864	15.473	22.096	16.127	16.819	17.471
	17.584		12.382		18.372	
	12.971		13.902		17.222	
40	24.551	21.287	22.651	23.146	16.819	28.936
	20.134		27.356		18.372	
	19.176		19.431		17.222	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค12 ปริมาณแคดเมียมในส่วนรากอ้อยที่ปลูกจากเรือนทดลอง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในรากอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
ควบคุม	3.637	3.939	3.034	4.633	3.762	4.607
	3.427		4.583		3.785	
	4.753		6.284		6.274	
10	38.270	35.167	54.002	52.122	34.481	28.399
	35.179		41.194		24.494	
	32.050		61.171		26.221	
20	53.971	47.865	57.907	57.604	40.988	33.534
	48.264		52.779		22.634	
	41.359		62.126		36.981	
40	91.518	94.353	94.203	96.566	94.450	81.968
	95.520		106.635		86.369	
	96.020		88.861		65.084	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค13 ปริมาณแคดเมียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิมที่ปลูกจากเรือนทดลอง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
ควบคุม	0.000		4.563		2.378	
	3.033	1.011	2.891	3.112	2.070	2.433
	0.000		1.883		2.851	
10	4.171		8.184		9.245	
	4.136	5.796	9.358	12.543	14.442	12.026
	9.082		20.088		12.390	
20	17.592		18.067		14.177	
	10.018	15.425	20.547	16.925	13.579	16.175
	18.666		12.161		20.770	
40	17.051		27.217		15.478	
	21.880	23.072	28.098	29.681	27.751	26.790
	30.286		33.727		37.141	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค14 ปริมาณแคดเมียมในส่วนชานอ้อยที่ปลูกจากเรือนทดลอง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในชานอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
ควบคุม	2.841	2.379	1.529	2.334	1.747	2.383
	2.534		2.024		2.221	
	1.762		3.450		3.181	
10	7.556	9.141	9.315	6.835	15.864	14.905
	11.355		6.362		17.773	
	8.513		4.829		11.078	
20	10.578	10.645	9.370	8.660	17.713	17.138
	11.072		8.313		16.219	
	10.284		8.297		17.483	
40	12.338	13.521	11.097	9.380	20.337	19.094
	17.516		6.429		19.625	
	10.709		10.614		17.320	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค15 ปริมาณแคดเมียมในส่วนน้ำอ้อยที่ปลูกจากเรือนทดลอง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในน้ำอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
ควบคุม	0.000	0.000	0.105	0.064	0.154	0.167
	0.000		0.000		0.166	
	0.000		0.087		0.181	
10	0.425	0.351	0.481	0.514	1.245	0.821
	0.321		0.663		0.614	
	0.306		0.398		0.605	
20	0.600	0.653	0.988	0.758	0.781	0.876
	0.716		0.503		0.566	
	0.642		0.784		1.282	
40	0.937	0.951	1.467	1.190	1.988	1.392
	1.032		1.049		1.566	
	0.884		1.055		0.622	

หมายเหตุ ความหนาแน่นของน้ำอ้อยเท่ากับ 1.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค16 ปริมาณแคดเมียมในส่วนใบอ้อยที่ปลูกจากเรือนทดลอง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในใบอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
ควบคุม	3.645	1.985	0.593	0.993	0.701	1.426
	0.598		0.594		1.630	
	1.721		1.794		1.947	
10	6.550	7.102	1.130	1.302	2.556	2.405
	6.418		1.543		1.923	
	8.338		1.234		2.736	
20	8.244	7.618	3.933	3.147	2.336	3.149
	7.909		3.588		2.265	
	6.702		1.922		4.846	
40	9.437	9.994	4.438	3.997	7.300	4.600
	10.820		3.115		2.725	
	9.727		4.437		3.774	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค17 ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อยที่ปลูกจากพื้นที่จริง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อย (เปอร์เซ็นต์)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
<3	0.095		0.298		1.443	
	0.143	0.189	0.648	0.447	2.468	1.599
	0.328		0.395		0.887	
3-20	0.017		0.304		0.230	
	0.128	0.054	0.108	0.178	1.267	0.552
	0.018		0.121		0.159	
>20	0.003		0.019		0.101	
	0.005	0.005	0.026	0.027	0.084	0.079
	0.008		0.036		0.052	

ตารางที่ ค18 ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อยที่ปลูกจากเรือนทดลอง

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อย (เปอร์เซ็นต์)					
	3 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	9 เดือน	เฉลี่ย
10	0.501		0.845		1.674	
	0.492	0.499	1.071	1.067	1.701	1.584
	0.505		1.287		1.377	
20	0.383		0.604		1.158	
	0.395	0.370	0.753	0.685	0.858	1.098
	0.331		0.698		1.279	
40	0.555		0.787		0.680	
	0.309	0.429	0.485	0.674	1.064	0.813
	0.423		0.750		0.694	

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

1. ระยะเวลาการปลูกอ้อยต่อปริมาณแคดเมียมในพื้นที่จริง

1.1 การทดสอบผลของระยะเวลาการปลูกที่มีต่อปริมาณแคดเมียมในดิน

1.1.1 ผลของระยะเวลาที่มีต่อปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
<3 mg/kg	Between Groups	.344	2	.172	.323	.736
	Within Groups	3.188	6	.531		
	Total	3.532	8			
3-20 mg/kg	Between Groups	24.776	2	12.388	.509	.625
	Within Groups	145.914	6	24.319		
	Total	170.690	8			
>20 mg/kg	Between Groups	407.143	2	203.571	.102	.905
	Within Groups	12033.329	6	2005.555		
	Total	12440.472	8			

<3 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
9 month	3	1.88833
6 month	3	2.22833
3 month	3	2.35000
Sig.		.481

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3-20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
9 month	3	11.70900
6 month	3	13.98067
3 month	3	15.76333
Sig.		.367

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

>20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
9 month	3	144.60733
6 month	3	153.11933
3 month	3	161.07933
Sig.		.678

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

1.1.2 ผลของระยะเวลาที่มีต่อปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
<3 mg/kg	Between Groups	.151	2	.075	43.278	.000
	Within Groups	.010	6	.002		
	Total	.161	8			
3-20 mg/kg	Between Groups	.672	2	.336	8.070	.020
	Within Groups	.250	6	.042		
	Total	.921	8			
>20 mg/kg	Between Groups	232.771	2	116.386	3.483	.099
	Within Groups	200.492	6	33.415		
	Total	433.263	8			

<3 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1	2	3
3 month	3	.05533		
6 month	3		.24733	
9 month	3			.36967
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3-20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
3 month	3	.18867	
6 month	3	.32667	
9 month	3		.82467
Sig.		.439	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

>20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
3 month	3	18.52033
6 month	3	27.57533
9 month	3	30.45667
Sig.		.050

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

1.2 การทดสอบผลของระยะเวลาการปลูกที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย

1.2.1 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกส่วน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
<3 mg/kg	Between Groups	2.170	2	1.085	7.681	.022
	Within Groups	.848	6	.141		
	Total	3.018	8			
3-20 mg/kg	Between Groups	4.801	2	2.401	4.960	.054
	Within Groups	2.904	6	.484		
	Total	7.706	8			
>20 mg/kg	Between Groups	43.497	2	21.749	6.863	.028
	Within Groups	19.013	6	3.169		
	Total	62.510	8			

<3 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
3 month	3	.26367	
6 month	3		1.18633
9 month	3		1.39333
Sig.		1.000	.525

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3-20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
3 month	3	.29100	
6 month	3	1.47100	1.47100
9 month	3		2.04567
Sig.		.083	.351

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

>20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
3 month	3	1.02533	
6 month	3	2.03100	
9 month	3		6.10967
Sig.		.515	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

1.2.2 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในรากอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
<3 mg/kg	Between Groups	5.245	2	2.623	.444	.661
	Within Groups	35.476	6	5.913		
	Total	40.722	8			
3-20 mg/kg	Between Groups	13.582	2	6.791	2.313	.180
	Within Groups	17.614	6	2.936		
	Total	31.196	8			
>20 mg/kg	Between Groups	19.228	2	9.614	.295	.755
	Within Groups	195.474	6	32.579		
	Total	214.701	8			

<3 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
3 month	3	3.60267
9 month	3	4.88567
6 month	3	5.42233
Sig.		.409

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3-20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
3 month	3	3.90100
9 month	3	5.02733
6 month	3	6.88067
Sig.		.085

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

>20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
3 month	3	25.22733
9 month	3	25.27733
6 month	3	28.35267
Sig.		.540

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

1.2.3 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิม

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
<3 mg/kg	Between Groups	3.685	2	1.843	1.566	.284
	Within Groups	7.059	6	1.177		
	Total	10.745	8			
3-20 mg/kg	Between Groups	1.024	2	.512	.165	.851
	Within Groups	18.593	6	3.099		
	Total	19.617	8			
>20 mg/kg	Between Groups	1.737	2	.869	2.145	.198
	Within Groups	2.430	6	.405		
	Total	4.167	8			

<3 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
6 month	3	2.27933
9 month	3	3.43633
3 month	3	3.77367
Sig.		.154

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3-20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
9 month	3	4.00167
6 month	3	4.16367
3 month	3	4.78433
Sig.		.617

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

>20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
9 month	3	5.08933
6 month	3	5.37733
3 month	3	6.13133
Sig.		.101

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

1.2.4 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในชานอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
<3 mg/kg	Between Groups	3.650	2	1.825	4.691	.059
	Within Groups	2.334	6	.389		
	Total	5.984	8			
3-20 mg/kg	Between Groups	.344	2	.172	.117	.891
	Within Groups	8.777	6	1.463		
	Total	9.121	8			
>20 mg/kg	Between Groups	77.722	2	38.861	3.335	.106
	Within Groups	69.912	6	11.652		
	Total	147.634	8			

<3 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1	2
6 month	3	1.94167	
3 month	3	3.08367	3.08367
9 month	3		3.43300
Sig.		.066	.518

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3-20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
6 month	3	3.11833
3 month	3	3.52700
9 month	3	3.53833
Sig.		.694

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

>20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
6 month	3	5.02533
9 month	3	6.48233
3 month	3	11.85867
Sig.		.056

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

1.2.5 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
<3 mg/kg	Between Groups	.000	2	.000	.	.
	Within Groups	.000	6	.000		
	Total	.000	8			
3-20 mg/kg	Between Groups	.000	2	.000	.	.
	Within Groups	.000	6	.000		
	Total	.000	8			
>20 mg/kg	Between Groups	.020	2	.010	2.072	.207
	Within Groups	.029	6	.005		
	Total	.049	8			

>20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
3 month	3	.00000
6 month	3	.07833
9 month	3	.11333
Sig.		.103

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2.6 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในใบอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
<3 mg/kg	Between Groups	6.484	2	3.242	3.480	.099
	Within Groups	5.589	6	.932		
	Total	12.073	8			
3-20 mg/kg	Between Groups	14.137	2	7.069	1.960	.221
	Within Groups	21.634	6	3.606		
	Total	35.771	8			
>20 mg/kg	Between Groups	10.460	2	5.230	.574	.591
	Within Groups	54.677	6	9.113		
	Total	65.137	8			

<3 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
6 month	3	1.95967	
3 month	3	2.48700	2.48700
9 month	3		3.96500
Sig.		.528	.110

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3-20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
6 month	3	2.63033
3 month	3	3.04767
9 month	3	5.47300
Sig.		.127

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

>20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
6 month	3	3.87000
3 month	3	5.98433
9 month	3	6.29733
Sig.		.377

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ระดับความเข้นข้นของแคดเมียมในดินต่อปริมาณแคดเมียมในพื้นที่จริง

2.1 การทดสอบผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อปริมาณแคดเมียมในดิน

2.1.1 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	46491.659	2	23245.829	16.631	.004
	Within Groups	8386.676	6	1397.779		
	Total	54878.335	8			
6 month	Between Groups	42265.780	2	21132.890	67.194	.000
	Within Groups	1887.034	6	314.506		
	Total	44152.814	8			
9 month	Between Groups	38127.125	2	19063.563	59.926	.000
	Within Groups	1908.722	6	318.120		
	Total	40035.847	8			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
<3 mg/kg	3	2.35000	
3-20 mg/kg	3	15.76333	
>20 mg/kg	3		161.07933
Sig.		.676	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
<3 mg/kg	3	2.22833	
3-20 mg/kg	3	13.98067	
>20 mg/kg	3		153.11933
Sig.		.448	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
<3 mg/kg	3	1.88833	
3-20 mg/kg	3	11.70900	
>20 mg/kg	3		144.60733
Sig.		.525	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

2.1.2 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	677.024	2	338.512	11.394	.009
	Within Groups	178.251	6	29.709		
	Total	855.275	8			
6 month	Between Groups	1489.316	2	744.658	1461.381	.000
	Within Groups	3.057	6	.510		
	Total	1492.373	8			
9 month	Between Groups	1783.490	2	891.745	275.185	.000
	Within Groups	19.443	6	3.241		
	Total	1802.933	8			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
<3 mg/kg	3	.05533	
3-20 mg/kg	3	.18867	
>20 mg/kg	3		18.52033
Sig.		.977	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
<3 mg/kg	3	.24733	
3-20 mg/kg	3	.32667	
>20 mg/kg	3		27.57533
Sig.		.896	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
<3 mg/kg	3	.36967	
3-20 mg/kg	3	.82467	
>20 mg/kg	3		30.45667
Sig.		.767	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 การทดสอบผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย

2.2.1 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกส่วน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	1.035	2	.517	3.368	.105
	Within Groups	.922	6	.154		
	Total	1.956	8			
6 month	Between Groups	1.088	2	.544	3.119	.118
	Within Groups	1.046	6	.174		
	Total	2.134	8			
9 month	Between Groups	38.998	2	19.499	5.612	.042
	Within Groups	20.847	6	3.475		
	Total	59.846	8			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05
		1
<3 mg/kg	3	.26367
3-20 mg/kg	3	.35767
>20 mg/kg	3	1.02533
Sig.		.061

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05
		1
<3 mg/kg	3	1.18633
3-20 mg/kg	3	1.47100
>20 mg/kg	3	2.02367
Sig.		.056

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
<3 mg/kg	3	1.39333	
3-20 mg/kg	3	2.04567	
>20 mg/kg	3		6.09900
Sig.		.683	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในรากอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	922.528	2	461.264	15.373	.004
	Within Groups	180.035	6	30.006		
	Total	1102.562	8			
6 month	Between Groups	988.974	2	494.487	65.900	.000
	Within Groups	45.022	6	7.504		
	Total	1033.995	8			
9 month	Between Groups	825.903	2	412.951	105.398	.000
	Within Groups	23.508	6	3.918		
	Total	849.411	8			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
<3 mg/kg	3	3.60267	
3-20 mg/kg	3	3.90100	
>20 mg/kg	3		25.22733
Sig.		.949	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
<3 mg/kg	3	5.42233	
3-20 mg/kg	3	6.88067	
>20 mg/kg	3		28.35267
Sig.		.539	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
<3 mg/kg	3	4.88567	
3-20 mg/kg	3	5.02733	
>20 mg/kg	3		25.27733
Sig.		.933	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.3 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิม

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	8.394	2	4.197	2.508	.162
	Within Groups	10.041	6	1.673		
	Total	18.435	8			
6 month	Between Groups	14.621	2	7.311	11.709	.008
	Within Groups	3.746	6	.624		
	Total	18.367	8			
9 month	Between Groups	4.235	2	2.118	.889	.459
	Within Groups	14.296	6	2.383		
	Total	18.531	8			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05
		1
<3 mg/kg	3	3.77367
3-20 mg/kg	3	4.78433
>20 mg/kg	3	6.13133
Sig.		.075

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
<3 mg/kg	3	2.27933	
3-20 mg/kg	3		4.16367
>20 mg/kg	3		5.37733
Sig.		1.000	.109

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05
		1
<3 mg/kg	3	3.43633
3-20 mg/kg	3	4.00167
>20 mg/kg	3	5.08933
Sig.		.252

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.4 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในชานอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	146.614	2	73.307	7.387	.024
	Within Groups	59.540	6	9.923		
	Total	206.153	8			
6 month	Between Groups	14.530	2	7.265	5.408	.045
	Within Groups	8.060	6	1.343		
	Total	22.590	8			
9 month	Between Groups	17.977	2	8.988	4.017	.078
	Within Groups	13.424	6	2.237		
	Total	31.401	8			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
<3 mg/kg	3	3.08367	
3-20 mg/kg	3	3.52700	
>20 mg/kg	3		11.85867
Sig.		.869	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
<3 mg/kg	3	1.94167	
3-20 mg/kg	3	3.11833	3.11833
>20 mg/kg	3		5.02533
Sig.		.260	.091

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05
		1
<3 mg/kg	3	3.43300
3-20 mg/kg	3	3.53833
>20 mg/kg	3	6.48233
Sig.		.053

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

2.2.5 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	.000	2	.000	.	.
	Within Groups	.000	6	.000		
	Total	.000	8			
6 month	Between Groups	.012	2	.006	3.974	.080
	Within Groups	.009	6	.002		
	Total	.022	8			
9 month	Between Groups	.026	2	.013	3.856	.084
	Within Groups	.020	6	.003		
	Total	.046	8			

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05 1
<3 mg/kg	3	.00000
3-20 mg/kg	3	.00000
>20 mg/kg	3	.07833
Sig.		.057

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05 1
<3 mg/kg	3	.00000
3-20 mg/kg	3	.00000
>20 mg/kg	3	.11333
Sig.		.059

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.6 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในใบอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	21.170	2	10.585	2.737	.143
	Within Groups	23.203	6	3.867		
	Total	44.372	8			
6 month	Between Groups	5.636	2	2.818	.325	.734
	Within Groups	51.947	6	8.658		
	Total	57.582	8			
9 month	Between Groups	8.393	2	4.197	3.730	.089
	Within Groups	6.751	6	1.125		
	Total	15.144	8			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05
		1
<3 mg/kg	3	2.48700
3-20 mg/kg	3	3.04767
>20 mg/kg	3	5.98433
Sig.		.080

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05
		1
<3 mg/kg	3	1.95967
3-20 mg/kg	3	2.63033
>20 mg/kg	3	3.87000
Sig.		.470

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
<3 mg/kg	3	3.96500	
3-20 mg/kg	3	5.47300	5.47300
>20 mg/kg	3		6.29733
Sig.		.132	.378

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3. ระยะเวลาการปลูกอ้อยต่อปริมาณแคดเมียมในเรือนทดลอง

3.1 การทดสอบผลของระยะเวลาการปลูกที่มีต่อปริมาณแคดเมียมในดิน

3.1.1 ผลของระยะเวลาที่มีต่อปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
control	Between Groups	.145	2	.073	.015	.985
	Within Groups	29.510	6	4.918		
	Total	29.656	8			
10 mg/kg	Between Groups	19.494	2	9.747	4.008	.078
	Within Groups	14.592	6	2.432		
	Total	34.086	8			
20 mg/kg	Between Groups	70.766	2	35.383	2.522	.160
	Within Groups	84.170	6	14.028		
	Total	154.936	8			
40 mg/kg	Between Groups	2.855	2	1.427	.029	.972
	Within Groups	295.712	6	49.285		
	Total	298.567	8			

Control

Duncan[a]

		Subset for alpha = .05
Time	N	1
9 month	3	2.24933
6 month	3	2.48833
3 month	3	2.54167
Sig.		.881

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

10 mg/kg

Duncan[a]

		Subset for alpha = .05
Time	N	1
9 month	3	9.98700
6 month	3	10.05200
3 month	3	13.14100
Sig.		.054

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
9 month	3	16.13000
6 month	3	21.80167
3 month	3	22.32100
Sig.		.098

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

40 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
9 month	3	30.91300
6 month	3	31.64533
3 month	3	32.29167
Sig.		.823

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3.1.2 ผลของระยะเวลาที่มีต่อปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
control	Between Groups	.012	2	.006	9.002	.016
	Within Groups	.004	6	.001		
	Total	.016	8			
10 mg/kg	Between Groups	25.901	2	12.951	3.341	.106
	Within Groups	23.261	6	3.877		
	Total	49.162	8			
20 mg/kg	Between Groups	137.213	2	68.607	11.954	.008
	Within Groups	34.434	6	5.739		
	Total	171.648	8			
40 mg/kg	Between Groups	520.483	2	260.242	5.879	.039
	Within Groups	265.579	6	44.263		
	Total	786.063	8			

Control

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1	2
3 month	3	.08000	
6 month	3	.10600	
9 month	3		.16833
Sig.		.270	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

10 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1	2
3 month	3	.09267	
6 month	3	2.70400	2.70400
9 month	3		4.19767
Sig.		.155	.389

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
3 month	3	.10867	
6 month	3	3.15167	
9 month	3		9.48267
Sig.		.171	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

40 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
3 month	3	.22233	
6 month	3	11.53933	11.53933
9 month	3		18.69433
Sig.		.082	.236

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3.2 การทดสอบผลของระยะเวลาการปลูกที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย

3.2.1 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกส่วน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Control	Between Groups	30.315	2	15.157	188.511	.000
	Within Groups	.482	6	.080		
	Total	30.797	8			
10 mg/kg	Between Groups	32.841	2	16.421	26.855	.001
	Within Groups	3.669	6	.611		
	Total	36.510	8			
20 mg/kg	Between Groups	28.663	2	14.332	8.120	.020
	Within Groups	10.589	6	1.765		
	Total	39.253	8			
40 mg/kg	Between Groups	81.846	2	40.923	5.421	.045
	Within Groups	45.291	6	7.549		
	Total	127.138	8			

Control

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
3 month	3	.79300		
6 month	3		1.78300	
9 month	3			5.08567
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

10 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
3 month	3	3.53233		
6 month	3		5.79767	
9 month	3			8.21067
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
3 month	3	4.49633	
6 month	3	6.66567	6.66567
9 month	3		8.86767
Sig.		.092	.089

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

40 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
3 month	3	6.95200	
6 month	3	10.43933	10.43933
9 month	3		14.33500
Sig.		.171	.133

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3.2.2 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในรากอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
control	Between Groups	.929	2	.465	.266	.775
	Within Groups	10.470	6	1.745		
	Total	11.399	8			
10 mg/kg	Between Groups	896.120	2	448.060	9.561	.014
	Within Groups	281.168	6	46.861		
	Total	1177.287	8			
20 mg/kg	Between Groups	879.562	2	439.781	8.516	.018
	Within Groups	309.845	6	51.641		
	Total	1189.407	8			
40 mg/kg	Between Groups	371.410	2	185.705	1.744	.253
	Within Groups	638.752	6	106.459		
	Total	1010.162	8			

Control

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
3 month	3	3.93900
6 month	3	4.60700
9 month	3	4.63367
Sig.		.555

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

10 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1	2
9 month	3	28.39867	
3 month	3	35.16633	
6 month	3		52.12233
Sig.		.271	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1	2
9 month	3	33.53433	
3 month	3	47.86467	47.86467
6 month	3		57.60400
Sig.		.050	.148

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

40 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
9 month	3	81.96767
3 month	3	94.35267
6 month	3	96.56633
Sig.		.145

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3.2.3 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิม

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
control	Between Groups	6.899	2	3.450	2.048	.210
	Within Groups	10.107	6	1.684		
	Total	17.006	8			
10 mg/kg	Between Groups	84.595	2	42.297	2.188	.193
	Within Groups	115.970	6	19.328		
	Total	200.564	8			
20 mg/kg	Between Groups	3.374	2	1.687	.089	.916
	Within Groups	113.400	6	18.900		
	Total	116.773	8			
40 mg/kg	Between Groups	65.847	2	32.924	.563	.597
	Within Groups	350.690	6	58.448		
	Total	416.538	8			

Control

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
3 month	3	1.01100
9 month	3	2.43300
6 month	3	3.11233
Sig.		.104

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

10 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
3 month	3	5.79633
9 month	3	12.02567
6 month	3	12.54333
Sig.		.119

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
3 month	3	15.42533
9 month	3	16.17533
6 month	3	16.92500
Sig.		.696

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

40 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
3 month	3	23.07233
9 month	3	26.79000
6 month	3	29.68067
Sig.		.345

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3.2.4 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในชานอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
control	Between Groups	.004	2	.002	.004	.996
	Within Groups	3.675	6	.613		
	Total	3.680	8			
10 mg/kg	Between Groups	103.657	2	51.829	7.404	.024
	Within Groups	41.998	6	7.000		
	Total	145.655	8			
20 mg/kg	Between Groups	117.989	2	58.994	149.503	.000
	Within Groups	2.368	6	.395		
	Total	120.356	8			
40 mg/kg	Between Groups	142.568	2	71.284	9.850	.013
	Within Groups	43.420	6	7.237		
	Total	185.988	8			

Control

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
6 month	3	2.33433
3 month	3	2.37900
9 month	3	2.38300
Sig.		.944

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

10 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1	2
6 month	3	6.83533	
3 month	3	9.14133	
9 month	3		14.90500
Sig.		.327	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1	2	3
6 month	3	8.66000		
3 month	3		10.64467	
9 month	3			17.13833
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

40 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1	2
6 month	3	9.38000	
3 month	3	13.52100	
9 month	3		19.09400
Sig.		.108	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3.2.5 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
control	Between Groups	.041	2	.021	18.388	.003
	Within Groups	.007	6	.001		
	Total	.048	8			
10 mg/kg	Between Groups	.343	2	.171	3.269	.110
	Within Groups	.314	6	.052		
	Total	.657	8			
20 mg/kg	Between Groups	.075	2	.038	.570	.593
	Within Groups	.395	6	.066		
	Total	.471	8			
40 mg/kg	Between Groups	.292	2	.146	.794	.494
	Within Groups	1.104	6	.184		
	Total	1.397	8			

Control

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
3 month	3	.00300	
6 month	3	.06400	
9 month	3		.16700
Sig.		.067	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

10 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
3 month	3	.35067
6 month	3	.51400
9 month	3	.82133
Sig.		.051

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
3 month	3	.65267
6 month	3	.75833
9 month	3	.87633
Sig.		.341

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

40 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
3 month	3	.95100
6 month	3	1.19033
9 month	3	1.39200
Sig.		.269

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3.2.6 ผลของระยะเวลาที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในใบอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
control	Between Groups	1.491	2	.746	.683	.540
	Within Groups	6.549	6	1.091		
	Total	8.040	8			
10 mg/kg	Between Groups	56.914	2	28.457	61.925	.000
	Within Groups	2.757	6	.460		
	Total	59.671	8			
20 mg/kg	Between Groups	39.962	2	19.981	15.079	.005
	Within Groups	7.951	6	1.325		
	Total	47.913	8			
40 mg/kg	Between Groups	65.446	2	32.723	14.313	.005
	Within Groups	13.718	6	2.286		
	Total	79.163	8			

Control

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
6 month	3	.99367
9 month	3	1.42600
3 month	3	1.98800
Sig.		.302

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

10 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1	2
6 month	3	1.30233	
9 month	3	2.40500	
3 month	3		7.10200
Sig.		.093	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1	2
6 month	3	3.14767	
9 month	3	3.14900	
3 month	3		7.61833
Sig.		.999	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

40 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1	2
6 month	3	3.99667	
9 month	3	4.59967	
3 month	3		9.99467
Sig.		.643	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

4. ระดับความเข้นข้นของแคดเมียมในดินต่อปริมาณแคดเมียมในเรือนทดลอง

4.1 การทดสอบผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อปริมาณแคดเมียมในดิน

4.1.1 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	1454.299	3	484.766	14.529	.001
	Within Groups	266.921	8	33.365		
	Total	1721.220	11			
6 month	Between Groups	1486.177	3	495.392	28.881	.000
	Within Groups	137.222	8	17.153		
	Total	1623.398	11			
9 month	Between Groups	1326.241	3	442.080	178.252	.000
	Within Groups	19.841	8	2.480		
	Total	1346.082	11			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
control	3	2.54167		
10 mg/kg	3	13.14100	13.14100	
20 mg/kg	3		22.32100	22.32100
40 mg/kg	3			32.29167
Sig.		.055	.087	.067

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
control	3	2.48833		
10 mg/kg	3	10.05200		
20 mg/kg	3		21.80167	
40 mg/kg	3			31.64533
Sig.		.056	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
control	3	2.24933			
10 mg/kg	3		9.98700		
20 mg/kg	3			16.13000	
40 mg/kg	3				30.91300
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

4.1.2 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	.038	3	.013	2.500	.133
	Within Groups	.041	8	.005		
	Total	.079	11			
6 month	Between Groups	221.522	3	73.841	2.810	.108
	Within Groups	210.239	8	26.280		
	Total	431.762	11			
9 month	Between Groups	576.858	3	192.286	13.613	.002
	Within Groups	112.998	8	14.125		
	Total	689.856	11			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05
		1
control	3	.08000
10 mg/kg	3	.09267
20 mg/kg	3	.10867
40 mg/kg	3	.22233
Sig.		.052

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
control	3	.10600	
10 mg/kg	3	2.70400	2.70400
20 mg/kg	3	3.15167	3.15167
40 mg/kg	3		11.53933
Sig.		.505	.077

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
control	3	.16833		
10 mg/kg	3	4.19767	4.19767	
20 mg/kg	3		9.48267	
40 mg/kg	3			18.69433
Sig.		.226	.123	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

4.2 การทดสอบผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย

4.2.1 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในอ้อยทุกส่วน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	58.354	3	19.451	78.724	.000
	Within Groups	1.977	8	.247		
	Total	60.331	11			
6 month	Between Groups	113.572	3	37.857	12.778	.002
	Within Groups	23.701	8	2.963		
	Total	137.273	11			
9 month	Between Groups	133.088	3	44.363	10.331	.004
	Within Groups	34.354	8	4.294		
	Total	167.442	11			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
control	3	.79300			
10 mg/kg	3		3.53233		
20 mg/kg	3			4.49633	
40 mg/kg	3				6.95200
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
control	3	1.78300		
10 mg/kg	3		5.79767	
20 mg/kg	3		6.66567	
40 mg/kg	3			10.43933
Sig.		1.000	.554	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
control	3	5.08567	
10 mg/kg	3	8.21067	
20 mg/kg	3	8.86767	
40 mg/kg	3		14.33500
Sig.		.064	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

4.2.2 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในรากอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	12678.484	3	4226.161	301.039	.000
	Within Groups	112.309	8	14.039		
	Total	12790.793	11			
6 month	Between Groups	12784.717	3	4261.572	81.334	.000
	Within Groups	419.165	8	52.396		
	Total	13203.882	11			
9 month	Between Groups	9466.779	3	3155.593	35.618	.000
	Within Groups	708.761	8	88.595		
	Total	10175.540	11			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
control	3	3.93900			
10 mg/kg	3		35.16633		
20 mg/kg	3			47.86467	
40 mg/kg	3				94.35267
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
control	3	4.60700		
10 mg/kg	3		52.12233	
20 mg/kg	3		57.60400	
40 mg/kg	3			96.56633
Sig.		1.000	.381	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
control	3	4.63367		
10 mg/kg	3		28.39867	
20 mg/kg	3		33.53433	
40 mg/kg	3			81.96767
Sig.		1.000	.523	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

4.2.3 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในท่อนพันธุ์เดิม

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	875.272	3	291.757	14.916	.001
	Within Groups	156.477	8	19.560		
	Total	1031.749	11			
6 month	Between Groups	1095.903	3	365.301	19.251	.001
	Within Groups	151.803	8	18.975		
	Total	1247.706	11			
9 month	Between Groups	916.508	3	305.503	8.670	.007
	Within Groups	281.886	8	35.236		
	Total	1198.394	11			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
control	3	1.01100	
10 mg/kg	3	5.79633	
20 mg/kg	3		15.42533
40 mg/kg	3		23.07233
Sig.		.222	.067

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
control	3	3.11233		
10 mg/kg	3		12.54333	
20 mg/kg	3		16.92500	
40 mg/kg	3			29.68067
Sig.		1.000	.253	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
control	3	2.43300		
10 mg/kg	3	12.02567	12.02567	
20 mg/kg	3		16.17533	16.17533
40 mg/kg	3			26.79000
Sig.		.083	.417	.060

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

4.2.4 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในชานอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	200.932	3	66.977	15.754	.001
	Within Groups	34.011	8	4.251		
	Total	234.943	11			
6 month	Between Groups	90.178	3	30.059	9.135	.006
	Within Groups	26.323	8	3.290		
	Total	116.501	11			
9 month	Between Groups	510.103	3	170.034	43.701	.000
	Within Groups	31.127	8	3.891		
	Total	541.230	11			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
control	3	2.37900		
10 mg/kg	3		9.14133	
20 mg/kg	3		10.64467	10.64467
40 mg/kg	3			13.52100
Sig.		1.000	.398	.126

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
control	3	2.33433	
10 mg/kg	3		6.83533
20 mg/kg	3		8.66000
40 mg/kg	3		9.38000
Sig.		1.000	.138

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
control	3	2.38300		
10 mg/kg	3		14.90500	
20 mg/kg	3		17.13833	17.13833
40 mg/kg	3			19.09400
Sig.		1.000	.203	.259

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

4.2.5 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	1.495	3	.498	150.230	.000
	Within Groups	.027	8	.003		
	Total	1.522	11			
6 month	Between Groups	1.993	3	.664	19.220	.001
	Within Groups	.276	8	.035		
	Total	2.269	11			
9 month	Between Groups	2.270	3	.757	3.988	.052
	Within Groups	1.518	8	.190		
	Total	3.788	11			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05			
		1	2	3	4
control	3	.00000			
10 mg/kg	3		.35067		
20 mg/kg	3			.65267	
40 mg/kg	3				.95100
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
control	3	.06400		
10 mg/kg	3		.51400	
20 mg/kg	3		.75833	
40 mg/kg	3			1.19033
Sig.		1.000	.146	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
control	3	.16700	
10 mg/kg	3	.82133	.82133
20 mg/kg	3	.87633	.87633
40 mg/kg	3		1.39200
Sig.		.092	.162

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

4.2.6 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อการสะสมแคดเมียมในใบอ้อย

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	102.181	3	34.060	28.899	.000
	Within Groups	9.429	8	1.179		
	Total	111.610	11			
6 month	Between Groups	18.854	3	6.285	11.094	.003
	Within Groups	4.532	8	.566		
	Total	23.386	11			
9 month	Between Groups	16.105	3	5.368	2.524	.131
	Within Groups	17.014	8	2.127		
	Total	33.119	11			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
control	3	1.98800		
10 mg/kg	3		7.10200	
20 mg/kg	3		7.61833	
40 mg/kg	3			9.99467
Sig.		1.000	.576	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
control	3	.99367	
10 mg/kg	3	1.30233	
20 mg/kg	3		3.14767
40 mg/kg	3		3.99667
Sig.		.629	.204

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
control	3	1.42600	
10 mg/kg	3	2.40500	2.40500
20 mg/kg	3	3.14900	3.14900
40 mg/kg	3		4.59967
Sig.		.203	.115

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. pH ในดินต่อปริมาณแคดเมียม

5.1 pH ในดินต่อระยะเวลาการปลูกอ้อยในพื้นที่จริง

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
<3 mg/kg	Between Groups	.128	2	.064	3.639	.092
	Within Groups	.106	6	.018		
	Total	.234	8			
3-20 mg/kg	Between Groups	.165	2	.083	.058	.945
	Within Groups	8.627	6	1.438		
	Total	8.792	8			
>20 mg/kg	Between Groups	.127	2	.064	1.632	.272
	Within Groups	.234	6	.039		
	Total	.362	8			

<3 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
6 month	3	7.22667
3 month	3	7.45333
9 month	3	7.50000
Sig.		.051

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3-20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
6 month	3	6.04667
9 month	3	6.28333
3 month	3	6.36667
Sig.		.762

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

>20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05 1
6 month	3	7.26333
9 month	3	7.30333
3 month	3	7.53333
Sig.		.157

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

5.2 pH ในดินต่อระยะเวลาการปลูกอ้อยในเรือนทดลอง

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Control	Between Groups	.000	2	.000	.000	1.000
	Within Groups	.307	6	.051		
	Total	.307	8			
10 mg/kg	Between Groups	.051	2	.025	1.469	.303
	Within Groups	.104	6	.017		
	Total	.155	8			
20 mg/kg	Between Groups	.048	2	.024	3.018	.124
	Within Groups	.048	6	.008		
	Total	.096	8			
40 mg/kg	Between Groups	.169	2	.084	3.024	.123
	Within Groups	.167	6	.028		
	Total	.336	8			

Control

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
3 month	3	4.5733
6 month	3	4.5733
9 month	3	4.5767
Sig.		.987

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

10 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
3 month	3	4.8167
9 month	3	4.8733
6 month	3	4.9967
Sig.		.156

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
6 month	3	4.7733
3 month	3	4.8100
9 month	3	4.9433
Sig.		.065

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

40 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
6 month	3	4.6400
3 month	3	4.8867
9 month	3	4.9600
Sig.		.064

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6. ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อยที่ปลูกในพื้นที่จริง

6.1 ผลของระยะเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียม

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
<3 mg/kg	Between Groups	3.384	2	1.692	7.352	.024
	Within Groups	1.381	6	.230		
	Total	4.765	8			
3-20 mg/kg	Between Groups	.402	2	.201	1.506	.295
	Within Groups	.801	6	.134		
	Total	1.204	8			
>20 mg/kg	Between Groups	.009	2	.004	18.329	.003
	Within Groups	.001	6	.000		
	Total	.010	8			

<3 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
3 month	3	.18873	
6 month	3	.44697	
9 month	3		1.59927
Sig.		.534	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3-20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05
		1
3 month	3	.05447
6 month	3	.17773
9 month	3	.55170
Sig.		.158

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

>20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
3 month	3	.00520	
6 month	3	.02720	
9 month	3		.07907
Sig.		.130	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6.2 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียม

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	.054	2	.027	4.234	.071
	Within Groups	.038	6	.006		
	Total	.092	8			
6 month	Between Groups	.271	2	.136	9.129	.015
	Within Groups	.089	6	.015		
	Total	.361	8			
9 month	Between Groups	3.632	2	1.816	5.299	.047
	Within Groups	2.056	6	.343		
	Total	5.688	8			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
>20 mg/kg	3	.00520	
3-20 mg/kg	3	.05447	.05447
<3 mg/kg	3		.18873
Sig.		.479	.085

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
>20 mg/kg	3	.02720	
3-20 mg/kg	3	.17773	
<3 mg/kg	3		.44697
Sig.		.181	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
>20 mg/kg	3	.07907	
3-20 mg/kg	3	.55170	.55170
<3 mg/kg	3		1.59927
Sig.		.361	.071

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7. ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมในดินของอ้อยที่ปลูกในเรือนทดลอง

7.1 ผลของระยะเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียม

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
10 mg/kg	Between Groups	1.766	2	.883	32.620	.001
	Within Groups	.162	6	.027		
	Total	1.929	8			
20 mg/kg	Between Groups	.801	2	.401	22.333	.002
	Within Groups	.108	6	.018		
	Total	.909	8			
40 mg/kg	Between Groups	.226	2	.113	3.786	.086
	Within Groups	.179	6	.030		
	Total	.406	8			

10 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
3 month	3	.4993		
6 month	3		1.0677	
9 month	3			1.5840
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

20 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05		
		1	2	3
3 month	3	.3697		
6 month	3		.6850	
9 month	3			1.0983
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

40 mg/kg

Duncan[a]

Time	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
3 month	3	.4290	
6 month	3	.6740	.6740
9 month	3		.8127
Sig.		.133	.364

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

7.2 ผลของระดับความเข้มข้นที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียม

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
3 month	Between Groups	.025	2	.013	2.318	.179
	Within Groups	.033	6	.005		
	Total	.058	8			
6 month	Between Groups	.302	2	.151	5.539	.043
	Within Groups	.163	6	.027		
	Total	.465	8			
9 month	Between Groups	.912	2	.456	10.800	.010
	Within Groups	.253	6	.042		
	Total	1.166	8			

3 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05
		1
20 mg/kg	3	.36967
40 mg/kg	3	.42900
10 mg/kg	3	.49933
Sig.		.083

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

6 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
40 mg/kg	3	.67400	
20 mg/kg	3	.68500	
10 mg/kg	3		1.06767
Sig.		.938	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

9 month

Duncan[a]

Concentration	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
40 mg/kg	3	.81267	
20 mg/kg	3	1.09833	
10 mg/kg	3		1.58400
Sig.		.140	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

1 2
3 4
5 6

1 การเตรียมแปลง และการปลูกอ้อย
2 การดูแลรักษา และการใส่ปุ๋ย
3 พื้นที่ปลูกอ้อย
4 ตัวอย่างอ้อยหลังจากทำความสะอาด
5-6 การแยกส่วนของอ้อย

รูปที่ จ1 การดำเนินงานวิจัยในพื้นที่จริงของอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

1 2
3 4
5 6

1 การเตรียมดิน และภาชนะปลูก
2 การเตรียมพืชทดลอง
3 การปลูกอ้อย และการดูแลรักษา
4 การเจริญเติบโตของอ้อยเมื่ออายุ 8 เดือน
5-6 การแยกส่วนของอ้อย

รูปที่ จ2 การดำเนินงานวิจัยในเรือนทดลองของอำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววราภรณ์ ศรีตัมภวา เกิดเมื่อวันที่ 11 มกราคม 2522 ที่อำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยม สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปี 2544 และได้ทำงานที่บริษัท สุรพลฟู้ดส์ จำกัด (มหาชน) สาขากบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี ในตำแหน่งหัวหน้าส่วนผลิต เป็นระยะเวลา 5 ปี หลังจากนั้น ได้เข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 ในระหว่างการศึกษาได้เข้าร่วมเสนอผลงานวิจัย ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติและระดับชาติ โดยได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานดังต่อไปนี้

1) วราภรณ์ ศรีตัมภวา และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2551. เปรียบเทียบการดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนในพื้นที่กับเรือนทดลอง. ใน การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน ครั้งที่ 2 (TISD2008), 28-29 มกราคม 2551, โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด จังหวัดขอนแก่น.
2) วราภรณ์ ศรีตัมภวา และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2551. การดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน. ใน การประชุมทางวิชาการเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 10, 18 มกราคม 2551, มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น.
3) Sritumpawa, W. and Sampanpanish, P. 2007. Cadmium Uptake by Sugarcane Grown in Contaminated Soil. In Proceeding of the 12th Biological Sciences Graduate Congress (BSGC) December 17-19, 2007, Kuala Lumpur, Malaysia.

จากการเข้าร่วมเสนอผลงานวิจัย ได้รับรางวัลการนำเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษา ระดับดีเด่น ในการเสนอผลงานประเภทบรรยาย ระดับปริญญาโท กลุ่มวิทยาศาสตร์ชีวภาพ ในการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 10 ประจำปี 2551 จัดโดยบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อวันที่ 18 มกราคม 2551