

ผลของอิดีที่เอดต่อการดูดตั้งแคดเมียมและสังกะสีของอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน



นางสาวณัฐกาญจน์ ตันติธีระศักดิ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF EDTA ON CADMIUM AND ZINC UPTAKE BY SUGARCANE GROWN IN
CONTAMINATED SOIL



Miss Natthakan Tantitheerasak

ศูนย์วิทยทรัพยากร
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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของอิทธิพลต่อการดูดตั้งแคดเมียมและสังกะสีของช้อยที่
ปลูกในดินที่ปนเปื้อน

โดย

นางสาวณัฐกาญจน์ ตันติธีระศักดิ์


สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

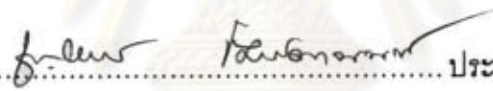
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

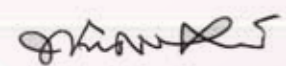
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

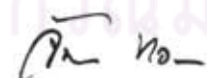
.....  คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาตวิทย์ โรมิตานนท์)

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

.....  กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา บุญ-หลง)

.....  กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทรา ทองคำเมา)

.....  กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. อุทัย เจริญศักดิ์)

ณัฐกาญจน์ ตันติธีระศักดิ์ : ผลของอีดีทีเอต่อการดูดซับแคดเมียมและสังกะสีของอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน. (EFFECT OF EDTA ON CADMIUM AND ZINC UPTAKE BY SUGARCANE GROWN IN CONTAMINATED SOIL) อ. ที่ปรีกษาวิทยานินพนธ์หลัก: ผศ.ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 152 หน้า.

การศึกษาผลของสาร EDTA ต่อการดูดซับแคดเมียมและสังกะสีด้วยอ้อย (*Saccharum officinarum* L.) ที่ปลูกในดินปนเปื้อน ซึ่งนำมาจากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และทำการปลูกในเรือนทดลอง เริ่มด้วยการปลูกอ้อยเป็นเวลา 1 เดือน และทำการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด และสังกะสีทั้งหมดในดิน น้ำชะ และปริมาณการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย 5 ส่วน คือ ใบ ชานอ้อย ท่อนพันธุ์ เดิม ราก และน้ำอ้อย นอกจากนี้ทำการศึกษาการเจริญเติบโตของอ้อย โดยพิจารณาจากน้ำหนักแห้งของพืช ความสูงของพืชทั้งในส่วนลำต้น และส่วนราก รวมถึงการสังเกตความเป็นพิษจากการแสดงอาการของอ้อย ผลการศึกษาพบว่า ชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ทำให้อ้อยมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมไปสะสมในรากได้มากที่สุด คิดเป็น 21.87, 44.68, 57.52 และ 41.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว ตามลำดับ ตามด้วยท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย ใบ และน้ำอ้อย และชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ทำให้อ้อยมีความสามารถในการดูดซับสังกะสีไปสะสมยังส่วนต่างๆ ได้มากที่สุด ทั้งนี้พบว่า ใบและชานอ้อยมีการสะสมสังกะสีมากที่สุดที่ระยะเวลา 2 เดือน ส่วนการสะสมสังกะสีในท่อนพันธุ์เดิม และรากมากที่สุดที่ระยะเวลา 4 เดือน สำหรับในน้ำอ้อย พบว่า การสะสมสังกะสีจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียม และสังกะสีของอ้อยคิดเป็นร้อยละเทียบกับปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่มีในดิน พบว่า การเติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 6 เดือน อ้อยมีประสิทธิภาพในการสะสมแคดเมียมทั้งต้นมากที่สุดเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ มีค่าเท่ากับ 0.27 เปอร์เซ็นต์ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) สำหรับการเติม EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 4 เดือน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีของอ้อยทั้งต้นมากที่สุด เท่ากับ 2.77 เปอร์เซ็นต์

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม.....
ปีการศึกษา 2553.....

ลายมือชื่อนิสิต ณัฐกาญจน์ ตันติธีระศักดิ์.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรีกษาวิทยานินพนธ์หลัก.....

5187156120 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : CADMIUM/ ZINC/ EDTA/ *Saccharum officinarum* L./ UPTAKE/ CONTAMINATED SOIL

NATTHAKAN TANTITHEERASAK : EFFECT OF EDTA ON CADMIUM AND ZINC UPTAKE BY SUGARCANE GROWN IN CONTAMINATED SOIL. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. PANTAWAT SAMPANPANISH, Ph.D., 152 pp.

This study investigated the effect of EDTA on cadmium and zinc uptake by sugarcane, (*Saccharum officinarum* L.) grown in contaminated soil from Maesot district, Tak province, Thailand. Sugarcanes were grown in pots for 1 month then EDTA was added at concentration levels of 0 (control), 0.5, 1 and 2 millimole per one kilogram of soil. Plants were harvested every 2, 4, 6 and 8 months. An analysis was made to determine levels of cadmium and zinc in the soil and in five plant parts: leaves, bagasses, underground stem, root and juice. Plants were also analyzed by dry weight, bagasses length, root length and expressions of toxicity. The results showed that EDTA at 1 millimole per one kilogram of soil resulted in maximum cadmium accumulation in the root of sugarcane and registering 21.87, 44.68, 57.52 and 41.97 mg kg⁻¹, at harvest time, respectively. This result was followed by underground stem, bagasses, leaves and juice. EDTA at 2 millimole per one kilogram of soil resulted in maximum zinc accumulation in various parts of sugarcane. At 2 months uptake was highest in leaves and bagasses. The accumulation of zinc in underground stem and root was highest at 4 months. Consequently, the accumulation efficiency sugarcane for cadmium and zinc was raised by EDTA. The results showed that EDTA at 1 millimole per one kilogram of soil produced a maximum cadmium accumulation at 0.27 percent in 6 months ($P \leq 0.05$). For the experimental time of 4 months the highest efficiency of zinc accumulation by sugarcane was 2.77 percent at EDTA 1 millimole per one kilogram.

Field of Study : Environmental Science.....

Academic Year : 2010.....

Student's Signature *Natthakan Tantitheerasak*

Advisor's Signature *Pantawat Sampanpanish*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณา ความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากหลายๆท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พันธุ์วัช สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์ รวมทั้งตรวจแก้ไขข้อบกพร่องให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา บุญ-หลง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทรา ทองคำภา และ ดร. อุทัย เข็นภักดี ที่กรุณามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นที่มีส่วนสำคัญในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ และสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนบางส่วนในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ปฏิบัติการในการทำงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงพี่ๆ นักวิทยาศาสตร์ทุกคน ที่ได้ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ คุณสมคิด แจ่มจรัส และเจ้าหน้าที่บริษัท แม่สอดพลังงานสะอาด จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลของพื้นที่ศึกษา ขอขอบคุณนางสาวภาริณี วนาพรรณณ์ นายกัลปพฤกษ์ คงเมือง นายพนัส พงศ์ผลาดิสัย และนายมงคลชัย อัสวดิษฐเลิศ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการออกภาคสนาม รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมาระหว่างที่ทำการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อมังกร คุณแม่พนิดา ตันติธีระศักดิ์ และทุกคนในครอบครัว ที่ให้เงินทุนสนับสนุนการศึกษาในครั้งนี้ รวมถึงให้ความรัก ความห่วงใย คำแนะนำ และเป็นกำลังใจที่สำคัญแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐาน.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 โลหะหนัก.....	5
2.1.1 แคดเมียม.....	5
1) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียม.....	5
2) แหล่งที่มาของแคดเมียม.....	6
3) การนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์.....	7
4) การปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม.....	8
5) ความเป็นพิษของแคดเมียม.....	10
2.1.2 สังกะสี.....	12
1) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสังกะสี.....	12
2) แหล่งที่มาของสังกะสี.....	13
3) การนำสังกะสีมาใช้ประโยชน์.....	14
4) การปนเปื้อนของสังกะสีในสิ่งแวดล้อม.....	14
5) ความเป็นพิษของสังกะสี.....	15
2.1.3 มาตรฐานของแคดเมียมและสังกะสีในดิน.....	16
2.1.4 การสะสมโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม.....	17

1) การสะสมโลหะหนักในดิน.....	17
2) การสะสมโลหะหนักในพืช.....	18
2.2 การบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation).....	18
2.2.1 ประเภทของการบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation).....	19
2.2.2 ข้อดีและข้อจำกัดของการบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation).....	20
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมโลหะหนักในดินและพืช.....	22
2.3.1 ชนิดของโลหะหนัก.....	22
2.3.2 ลักษณะสมบัติของดิน.....	22
2.3.3 ชนิดและส่วนต่างๆ ของพืช.....	22
2.3.4 ความเป็นกรด-ด่าง (PH) ของดิน.....	23
2.3.5 ปริมาณของอินทรีย์วัตถุ.....	23
2.3.6 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชัน หรือศักย์รีดอกซ์ (Oxidation - Reduction Potential; ORP).....	23
2.3.7 สภาพแวดล้อมต่างๆ.....	23
2.3.8 ลักษณะและสมบัติบางอย่างของดิน.....	24
2.4 สารคีเลต (Chelating Agent).....	24
2.4.1 ความหมายของสารคีเลต.....	24
2.4.2 ประเภทของสารคีเลต.....	25
2.4.3 การใช้ประโยชน์ของสารคีเลต.....	25
2.4.4 สารคีเลตที่เลือกใช้ในงานวิจัย.....	25
1) อีดีทีเอ (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid).....	25
1.1) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาร EDTA.....	26
1.2) ความเป็นพิษของสาร EDTA.....	27
1.3) การสลายตัวของสาร EDTA.....	27
1.4) สาร EDTA กับการบำบัดโลหะหนักในดิน.....	28
2.5 อ้อย.....	29
2.5.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของอ้อย.....	29
2.5.2 การเจริญเติบโตของอ้อย.....	35

บทที่	หน้า
2.5.3	ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของอ้อย..... 37
2.5.4	โรคอ้อย..... 40
2.5.5	แมลงศัตรูอ้อย..... 41
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 42
3	วิธีดำเนินการวิจัย..... 46
3.1	อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย..... 46
3.1.1	อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการปลูกพืช..... 46
3.1.2	อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างดิน พืชและน้ำชะ..... 46
3.1.3	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง..... 47
3.1.4	สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง..... 48
3.2	สถานที่ดำเนินการวิจัย..... 48
3.2.1	สถานที่เก็บตัวอย่างดิน..... 48
3.2.2	สถานที่ปลูกพืช..... 48
3.2.3	สถานที่วิเคราะห์ตัวอย่าง..... 48
3.3	ระยะเวลาการวิจัย..... 49
3.4	การดำเนินการวิจัย..... 51
3.4.1	การเตรียมดิน ภาชนะปลูก พืช และสารเคีเลต..... 52
3.4.2	วิธีการปลูกพืช และการดูแลรักษา..... 54
3.4.3	การเก็บตัวอย่าง..... 55
3.4.4	การวิเคราะห์ตัวอย่าง..... 56
3.4.5	การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ..... 57
4	ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย..... 58
4.1	คุณสมบัติเบื้องต้นของดินทดลอง..... 58
4.1.1	ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในดิน..... 59
4.1.2	ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ในดิน..... 60
4.1.3	ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential; ORP) ในดิน..... 61
4.2	ลักษณะของน้ำชะ..... 62
4.2.1	ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในน้ำชะ..... 63

4.2.2 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential; ORP) ในน้ำชะ.....	63
4.2.3 ปริมาณการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในน้ำชะ.....	64
4.3 ผลของสาร EDTA ต่อการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในดิน.....	67
4.3.1 ผลของสาร EDTA ต่อการสะสมแคดเมียมในดิน.....	67
4.3.2 ผลของสาร EDTA ต่อปริมาณแคดเมียมในดินที่พืชดูดตั้งได้ (Available)....	69
4.3.3 ผลของสาร EDTA ต่อการสะสมสังกะสีในดิน.....	71
4.3.4 ผลของสาร EDTA ต่อปริมาณสังกะสีในดินที่พืชดูดตั้งได้ (Available).....	72
4.4 ผลของสาร EDTA ต่อการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย.....	74
4.4.1 ผลของสาร EDTA ต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย.....	74
4.4.2 ผลของสาร EDTA ต่อการสะสมสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย.....	83
4.5 ผลของสาร EDTA ต่อการแสดงความเป็นพิษ และการเจริญเติบโตของอ้อย.....	90
4.5.1 ผลของสาร EDTA ต่อการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งใน ส่วนต่างๆ ของอ้อย.....	91
4.5.2 ผลของสาร EDTA ต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงของลำต้น และความยาวรากของอ้อย.....	98
4.6 การเปรียบเทียบผลของสาร EDTA ต่อความสามารถในการสะสมแคดเมียมและ สังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย.....	102
4.6.1 การเปรียบเทียบผลของสาร EDTA ต่อความสามารถในการสะสม แคดเมียมไว้ในส่วนต่างๆ ของอ้อย.....	102
4.6.2 การเปรียบเทียบผลของสาร EDTA ต่อความสามารถในการสะสม สังกะสีไว้ในส่วนต่างๆ ของอ้อย.....	107
4.6.3 ผลของสาร EDTA ต่อประสิทธิภาพในการดูดตั้งแคดเมียมของอ้อย.....	110
4.6.4 ผลของสาร EDTA ต่อประสิทธิภาพในการดูดตั้งสังกะสีของอ้อย.....	112
4.7 การประมาณการค่าใช้จ่าย.....	114
4.8 สมดุลมวล (Mass Balance) ของสาร EDTA ต่อการดูดตั้งแคดเมียม และสังกะสีของอ้อย.....	115

บทที่		หน้า
5	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	120
	5.1 สรุปผลการวิจัย.....	120
	5.2 ข้อเสนอแนะ.....	122
	รายการอ้างอิง.....	123
	ภาคผนวก.....	129
	ภาคผนวก ก.....	130
	ภาคผนวก ข.....	133
	ภาคผนวก ค.....	134
	ภาคผนวก ง.....	150
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	152



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	คุณสมบัติของแคดเมียม..... 6
2.2	ความเป็นพิษแบบเฉียบพลันของแคดเมียมที่มีต่อมนุษย์โดยการกิน..... 12
2.3	คุณสมบัติของสังกะสี..... 13
2.4	ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของแคดเมียมและสังกะสีในดินที่ยอมรับได้ใน บางประเทศ..... 17
2.5	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาร EDTA..... 26
3.1	วันที่ทำการทดลอง และดำเนินการเก็บตัวอย่างดิน น้ำชะ และพืชในเรือนทดลอง..... 50
3.2	พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์ดินที่นำมาศึกษา..... 53
3.3	ปริมาณสาร EDTA ที่เติมลงในดินทดลอง..... 54
4.1	คุณสมบัติเบื้องต้นของดินทดลอง..... 59
4.2	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในดิน..... 60
4.3	ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential; ORP) ในดิน..... 62
4.4	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในน้ำชะ..... 63
4.5	ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential; ORP) ในน้ำชะ..... 64
4.6	ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำชะ ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA..... 66
4.7	ปริมาณการสะสมสังกะสีในน้ำชะ ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA..... 66
4.8	ปริมาณการสะสมของแคดเมียมทั้งหมดในดิน ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA..... 68
4.9	ปริมาณแคดเมียมในดินที่พืชดูดตั้งได้ (Available) ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA..... 70
4.10	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA..... 72
4.11	ปริมาณสังกะสีในดินที่พืชดูดตั้งได้ (Available) ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA..... 74

ตาราง	หน้า
4.12 ปริมาณแคลเซียมทั้งหมดในส่วนใบอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	80
4.13 ปริมาณแคลเซียมทั้งหมดในส่วนชานอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	81
4.14 ปริมาณแคลเซียมทั้งหมดในส่วนท่อนพันธุ์เดิม ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	81
4.15 ปริมาณแคลเซียมทั้งหมดในส่วนราก ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	82
4.16 ปริมาณแคลเซียมทั้งหมดในส่วนน้ำอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	82
4.17 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนใบอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	88
4.18 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนชานอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	89
4.19 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนท่อนพันธุ์เดิม ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	89
4.20 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนราก ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	90
4.21 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนน้ำอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	90
4.22 น้ำหนักแห้งในส่วนใบอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	96
4.23 น้ำหนักแห้งในส่วนในชานอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	96
4.24 น้ำหนักแห้งในส่วนท่อนพันธุ์เดิม ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	97
4.25 น้ำหนักแห้งในส่วนราก ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	97

4.26	ปริมาตรในส่วนน้ำอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	98
4.27	การเจริญเติบโตด้านความสูงของลำต้น ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	100
4.28	การเจริญเติบโตด้านความยาวราก ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA.....	101
4.29	แสดงค่าใช้จ่ายในการลงทุน (บาทต่อไร่).....	114
4.30	สมดุลมวล (Mass Balance) ของสาร EDTA ต่อการดูดตั้งแคดเมียมของอ้อย.....	116
4.31	สมดุลมวล (Mass Balance) ของสาร EDTA ต่อการดูดตั้งสังกะสีของอ้อย.....	118

ค1	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน.....	134
ค2	ปริมาณแคดเมียมในดินที่พืชดูดตั้งได้ (Available).....	135
ค3	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนใบอ่อน.....	136
ค4	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนชานอ่อน.....	137
ค5	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนท่อนพันธุ์เดิม.....	138
ค6	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนรากอ่อน.....	139
ค7	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนน้ำอ่อน.....	140
ค8	ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำชะ.....	141
ค9	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน.....	142
ค10	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินที่พืชดูดตั้งได้ (Available).....	143
ค11	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนใบอ่อน.....	144
ค12	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนชานอ่อน.....	145
ค13	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนท่อนพันธุ์เดิม.....	146
ค14	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนรากอ่อน.....	147
ค15	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนน้ำอ่อน.....	148
ค16	ปริมาณการสะสมสังกะสีในน้ำชะ.....	149

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ประเภทของการบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation).....20
2.2	สูตรโครงสร้างของสาร EDTA.....26
2.3	ลักษณะของอ้อย.....29
2.4	ลักษณะของลำต้น.....30
2.5	ลักษณะของใบ.....33
2.6	ลักษณะของช่อดอก.....33
2.7	ลักษณะของราก.....35
2.8	ระยะการเจริญเติบโตของอ้อย.....36
3.1	แผนที่ และตำแหน่งของจุดเก็บตัวอย่างดิน ในพื้นที่ของตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก.....49
3.2	แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....51
4.1	ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ในดินที่ระยะเวลาต่างๆ.....61
4.2	การสะสมโลหะหนักในน้ำชะ ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง ก) แคดเมียม และ ข) สังกะสี.....65
4.3	การสะสมแคดเมียมในดิน ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....68
4.4	ปริมาณแคดเมียมในดินที่พืชดูดได้ (Available) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....70
4.5	การสะสมสังกะสีในดิน ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....71
4.6	ปริมาณสังกะสีในดินที่พืชดูดได้ (Available) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....73
4.7	ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใบที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....76
4.8	ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนชานอ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....77
4.9	ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....77
4.10	ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนรากที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....78
4.11	ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนน้ำอ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....78

รูปที่	หน้า
4.12 ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนใบที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....	84
4.13 ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนชานอ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง...	85
4.14 ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนท่อนพันธุ์เดิมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....	85
4.15 ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนรากที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....	86
4.16 ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนน้ำอ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง....	86
4.17 น้ำหนักแห้งในส่วนใบที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....	92
4.18 น้ำหนักแห้งในส่วนชานอ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....	93
4.19 น้ำหนักแห้งในส่วนท่อนพันธุ์เดิมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....	93
4.20 น้ำหนักแห้งในส่วนรากที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....	94
4.21 ปริมาตรในส่วนน้ำอ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....	94
4.22 ความสูงของลำต้นอ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....	99
4.23 ความยาวของรากอ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....	101
4.24 ความสามารถของสาร EDTA ในการดูดดึงแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 1) 2 เดือน 2) 4 เดือน 3) 6 เดือน และ 4) 8 เดือน....	105
4.25 ความสามารถของสาร EDTA ในการดูดดึงสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 1) 2 เดือน 2) 4 เดือน 3) 6 เดือน และ 4) 8 เดือน....	108
4.26 ประสิทธิภาพของสาร EDTA ในการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยทั้งต้นที่ระดับ ความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....	110
4.27 ประสิทธิภาพของสาร EDTA ในการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยทั้งต้น ที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง.....	111
4.28 ประสิทธิภาพของสาร EDTA ในการดูดดึงสังกะสีของอ้อยทั้งต้น ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง.....	112
4.29 ประสิทธิภาพของสาร EDTA ในการดูดดึงสังกะสีของอ้อยทั้งต้น ที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง.....	113

รูปประกอบภาคผนวก

หน้า

ง1	ก) การเตรียมดิน และ ข) การเตรียมภาชนะปลูก.....	150
ง2	ก) การเตรียมพืชทดลอง และ ข) การปลูกพืชลงในภาชนะปลูก	150
ง3	ก) การเจริญเติบโตของอ้อยที่ 2 เดือน และ ข) การเจริญเติบโตของอ้อยที่ 4 เดือน.....	150
ง4	ก) การเจริญเติบโตของอ้อยที่ 6 เดือน และ ข) การเจริญเติบโตของอ้อยที่ 8 เดือน.....	151
ง5	การเก็บตัวอย่างอ้อย และการแยกส่วนของอ้อย.....	151
ง6	ก) การอบตัวอย่างดิน และ ข) การอบตัวอย่างพืช.....	151



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมของประเทศไทยในปัจจุบันมีมากขึ้นในหลายพื้นที่ โดยปัญหาดังกล่าวมักเกิดจากการทำกิจกรรมต่างๆ เช่น การทำเหมือง และการทำเกษตรกรรมที่มีการเปิดหน้าดินเพื่อการเพาะปลูก ทำให้มีการปนเปื้อนโลหะหนักกระจายลงสู่แหล่งน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และถูกสะสมอยู่ในดิน รวมถึงสภาพธรรมชาติทางธรณีวิทยาของพื้นที่ซึ่งจะมีกระบวนการผุพังสลายตัวตามธรรมชาติและเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนัก จากการศึกษาการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินและพืชผลการเกษตร บริเวณห้วยแม่ดาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ของสถาบันจัดการทรัพยากรน้ำนานาชาติ (International Water Management Institute - IWMI) ร่วมกับกรมวิชาการเกษตร (Department of Agriculture - DOA) ภายใต้โครงการความร่วมมือ IWMI - DOA Collaborative Project ปี 2541-2545 ได้นำรายงานเสนอต่อกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมเพื่อดำเนินการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยพบว่า คุณภาพน้ำใต้ดิน น้ำผิวดิน และสัตว์น้ำ มีค่าการปนเปื้อนแคดเมียมอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการบริโภค สำหรับตะกอนดินในท้องน้ำของห้วยแม่ดาว มีระดับการปนเปื้อนของสารแคดเมียมเกินค่ามาตรฐานตลอดลำห้วย (ยกเว้นบริเวณต้นน้ำ) ซึ่งค่าสูงสุดเกินค่ามาตรฐานของประเทศแคนาดาถึง 100 เท่า ส่วนดินในพื้นที่การทำเกษตรกรรมซึ่งมีการใช้น้ำจากห้วยแม่ดาวเพื่อการเพาะปลูก พบการปนเปื้อนของแคดเมียมสูงเกินมาตรฐาน ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของแคดเมียมในพื้นที่เกษตรกรรมมีลักษณะเข้มข้นในจุดที่ใกล้กับจุดรับน้ำจากคูส่งน้ำชลประทานพื้นบ้าน (ลำเหมือง) และลดลงตามระยะทาง โดยขอบเขตของการปนเปื้อนและควบคุมการเพาะปลูกในบริเวณห้วยแม่ดาวและห้วยแม่กุ ครอบคลุมเนื้อที่ประมาณ 8,000 ไร่ นอกจากนี้ข้าวที่เพาะปลูกในพื้นที่ (ผลผลิตในปี 2546) พบว่า มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในช่วงตั้งแต่ร้อยละ 10-20 ไม่สามารถตรวจพบได้ถึงระดับ 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมข้าว ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานกำหนดไว้ที่ 0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมข้าว (Codex, 2007) จากปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียมในดินพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ได้มีการเสนอมาตรการป้องกัน และแก้ไข ไว้หลายวิธีการด้วยกัน ซึ่งหนึ่งในมาตรการนั้นคือ การปลูกพืชที่ไม่ใช้เป็นอาหาร (Cultivation of Non-food Crop) โดยพืชที่ปลูกอาจเป็นไม้ยืนต้นโตเร็วหรือไม้ดอกไม่ประดับที่ให้ผลทางเศรษฐกิจไม่น้อยกว่าการปลูกข้าวของราษฎร เช่น ยูคาลิปตัส ดาวเรือง เป็นต้น (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2549)

เทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในดินมีหลายวิธี ทั้งเทคโนโลยีทางชีวภาพ เช่น การฟื้นฟูสภาพโดยชีววิธี (Bioremediation) ซึ่งเป็นการกำจัดสารปนเปื้อนด้วยการใช้จุลินทรีย์หรือจุลินทรีย์ เทคโนโลยีทางเคมีและฟิสิกส์ เช่น การล้างดิน (Soil Washing) ซึ่งในปัจจุบันมีอีกวิธีการหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจคือ การใช้พืช (Phytoremediation) ซึ่งเป็นการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโดยการดูดซับโลหะหนักไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช และเป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำ (Sanpanpanish et al, 2006) สามารถนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ได้และยังไม่รบกวนหน้าดินอีกด้วย

จากภาวะปัญหาการขาดแคลนพลังงานเชื้อเพลิงของประเทศในปัจจุบัน จึงได้มีการนำอ้อยมาศึกษา เพื่อใช้ประโยชน์จากอ้อยนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล ซึ่งนอกจากจะได้พลังงานทดแทนจากอ้อยแล้ว จากการศึกษาของ วราภรณ์ ศรีตัมภวา (2550) พบว่า อ้อยเป็นตัวยุติการดูดซับแคดเมียมที่ปนเปื้อนในพื้นที่ออกจากดินได้อีกด้วย อีกทั้งอ้อยเป็นพืชที่ง่ายต่อการปลูกและการดูแลรักษา มีความทนทานต่อสภาพภูมิประเทศ และสามารถขยายพันธุ์ได้ดี และเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก จึงควรที่จะมีการนำพืชชนิดนี้มาทำการศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักออกจากดินร่วมกับการใช้สารคีเลต (Chelating Agent) ซึ่งสารพวกนี้เป็นสารที่ให้ไอออนของโลหะ หรือจุลธาตุอาหารยึดเกาะและรวมกันเป็นสารประกอบคีเลต ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความคงตัว และสามารถปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชได้ที่ละน้อย (ชวนพิศ แดงสวัสดิ์, 2544) ซึ่งช่วยให้พืชดูดซับโลหะหนักไว้ในส่วนต่างๆ ได้มากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความสามารถของอ้อยในการดูดซับแคดเมียมและสังกะสีในดินที่ปนเปื้อน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในส่วน ราก ท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย ใบ และน้ำอ้อย
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของสาร EDTA และความเข้มข้นของสาร EDTA ที่มีผลต่อการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลของสาร EDTA ต่อการแสดงอาการและความเป็นพิษของอ้อยเนื่องจากแคดเมียมและ/หรือสังกะสี

1.3 สมมุติฐาน

1.3.1 อ้อยเป็นพืชที่มีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีไปสะสมในส่วนต่างๆ ได้ต่างกัน และมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลามากขึ้น

1.3.2 ความเข้มข้นของสาร EDTA มีผลต่อการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย และผลแตกต่างกันในแต่ละระยะเวลา

1.3.3 ระดับของสาร EDTA ที่ทำการศึกษาจะไม่ส่งผลกระทบต่อการแสดงความเป็นพิษและการเจริญเติบโตของอ้อยตลอดการทดลอง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ท่อนพันธุ์อ้อยที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ พันธุ์ LK 92-11

1.4.2 สารคีเลตที่ใช้คือ เอทิลีนไดอะมีนเตตระแอสिटริก แอซิด (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA) โดยแบ่งปริมาณการใช้สารคีเลตเป็น 3 ระดับ คือ 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยทำการใส่สารคีเลตเมื่ออ้อยมีอายุประมาณ 1 เดือน

1.4.3 การศึกษาปริมาณความเข้มข้นของสาร EDTA ต่อประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีของอ้อยในส่วนต่างๆ ได้แก่ ราก ท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย ใบ และน้ำอ้อย ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนจากพื้นที่ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก เป็นระยะเวลา 8 เดือน

1.4.4 ดินที่ใช้ในการศึกษานำมาจากพื้นที่ดินที่ปนเปื้อน บริเวณอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยดินมีการปนเปื้อนแคดเมียมมากกว่า 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และนำดินที่ปนเปื้อนจากพื้นที่มาทำการทดลองในเรือนเพาะชำ ทำการวางแผนแบบ Split plot in Randomized Complete Block Design (RCBD) และทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

1.4.5 ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างดิน น้ำชะ และตัวอย่างอ้อย (ราก ท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย ใบ และน้ำอ้อย) ได้แก่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน ภายหลังจากใส่สารคีเลตแล้ว และทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total Cd) และปริมาณสังกะสีทั้งหมด (Total Zn)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงปริมาณความเข้มข้นของสาร EDTA ต่อประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีของอ้อย

1.5.2 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยไปเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดแคดเมียมและสังกะสีในดินที่มีการปนเปื้อนได้

1.5.3 ได้แนวทางการปฏิบัติในการกำจัดแคดเมียม และสังกะสีที่ปนเปื้อนในดินที่ง่าย สะดวก และมีต้นทุนต่ำ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก (Heavy Metal)

โลหะหนัก (Heavy Metal) หมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะ ตั้งแต่ 5 ขึ้นไป ซึ่งเป็นธาตุในตารางธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic Number) ในช่วง 23-92 อยู่ในคาบที่ 4-7 ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส นิกเกิล โครเมียม เหล็ก สังกะสี และปรอท โดยไม่รวมโลหะที่เป็นโลหะอัลคาไล (Alkaline) และอัลคาไลเอิร์ท (Alkaline Earth) (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) โลหะหนักจัดเป็นธาตุพิษ (Toxic Elements) ที่สามารถก่อให้เกิดมลพิษเมื่อเกิดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปนเปื้อนธาตุโลหะหนักในพื้นที่การเพาะปลูกและแหล่งน้ำ เนื่องจากธาตุโลหะหนักสามารถถ่ายทอดไปสู่ระบบห่วงโซ่อาหาร ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ได้ จึงขอกล่าวถึงธาตุโลหะหนัก 2 ธาตุ ได้แก่ แคดเมียม และสังกะสี เนื่องจากเป็นธาตุที่ปนเปื้อนอยู่ในดินที่นำมาศึกษา

2.1.1 แคดเมียม (Cadmium)

1) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียม

แคดเมียม (Cd) เป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ IIB ในตารางธาตุ (Periodic Table of Elements) โดยอยู่ติดกับสังกะสี จึงมีลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีคล้ายคลึงกัน จึงพบแคดเมียมร่วมกับสังกะสีเสมอ แคดเมียมเป็นโลหะที่มีสีเงินแกมขาว มีคุณสมบัติเบา อ่อน ดัดงอได้ง่าย และทนต่อการกัดกร่อน (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2541) ซึ่งคุณสมบัติของแคดเมียม แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแคดเมียม

คุณสมบัติ	รายละเอียด
สูตรทางเคมี	Cd
เลขอะตอม	48
น้ำหนักอะตอมหรือโมเลกุล	112.40 amu
ความถ่วงจำเพาะ	8.65
จุดหลอมเหลว	320.9 °C
จุดเดือด	767 °C
ความดันไอ ที่ 400 °C และ 500 °C	1.4 mm และ 16 mm
การละลาย	ไม่ละลายในน้ำ ละลายได้ดีในกรดไนตริก (HNO ₃) ละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) อย่างช้าๆ
การออกซิไดซ์	ในอากาศที่มีความชื้นแคดเมียมจะถูกออกซิไดซ์ (Oxidize) อย่างช้าๆ ไปเป็น แคดเมียมออกไซด์ (CdO)

2) แหล่งที่มาของแคดเมียม

แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่สามารถพบได้ในธรรมชาติทั้งในดิน น้ำ พืช และสิ่งแวดล้อมทั่วไป จากการศึกษาค้นคว้าแคดเมียมในระบบสิ่งแวดล้อมโลกพบว่า มีแคดเมียมที่ผิวดินประมาณ 6.6×10^{13} กรัม ในบรรยากาศมีประมาณ 1.5×10 กรัม ในมหาสมุทรประมาณ 1.1×10^{14} กรัม ในดินตะกอนมีประมาณ 2.5×10^{18} กรัม ในชีวะาลัย (Biosphere) อยู่ในส่วนที่เป็นแผ่นดินประมาณ 7.2×10^{10} กรัม อยู่ในส่วนที่เป็นทะเลประมาณ 1.2×10^{10} กรัม ซึ่งทั้งหมดนี้มีหน่วยการละลาย (Flux Unit) 10 กรัมต่อปี (Nriagu, 1980) ทั้งนี้แคดเมียมในธรรมชาติมีปริมาณที่แตกต่างกันออกไป เช่น ในหินอัคนีและหินตะกอนจะมีปริมาณแคดเมียมไม่เกิน 0.3 ppm (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) โดยแคดเมียมจะอยู่ร่วมกับแร่สังกะสี ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ในรูปของแร่แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ร้อยละ 0.01-0.5 โดยประมาณ ซึ่งมีอัตราส่วนของแคดเมียมและสังกะสีเท่ากับ 1:100 ถึง 1:1,000 นอกจากนี้ยังอยู่ร่วมกับแร่ซิงค์ซิลิเกต (Zn_2SiO_4) และซิงค์คาร์บอเนต ($ZnCO_3$) (อนงนาฏ ศรีประโชติ, 2549) นอกจากนี้ยังพบแคดเมียมอยู่ในรูปสารประกอบอื่นๆ เช่น แคดเมียมออกไซด์ (CdO) หรือ แคดเมียมคาร์บอเนต ($CdCO_3$) (Aario, 2001) ในการสลายตัวของหินและแร่ แคดเมียมในดินอยู่ในสภาพละลายได้ง่ายโดยจะอยู่ในรูป Cd^{2+} เป็นส่วนใหญ่ ซึ่ง

อาจอยู่ในรูปไอออนเชิงซ้อน และสารประกอบ เช่น CdCl_2 , CdOH^+ , CdHCO_3^+ , CdCl_3 , $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$ เป็นต้น (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545)

3) การนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์

แคดเมียมถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ และสินค้าอุปโภค (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2541) ดังนี้

3.1) ใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสมอัลลอยด์ (Alloy) เพื่อเพิ่มความเหนียวและความทนทานต่อการกัดกร่อน เช่น

3.1.1) อัลลอยด์ของทองแดงที่มีแคดเมียม 1% (Cadmium Bronze) ใช้ในการผลิตเส้นลวดโทรเลขและโทรศัพท์

3.1.2) อัลลอยด์ของทองแดงและตะกั่ว ซึ่งมีแคดเมียมผสมอยู่ 20% ใช้ในการผลิตแบบพิมพ์ (Printing Plates)

3.1.3) อัลลอยด์ของทองแดง แคดเมียม และเซอร์โคเนียม ใช้ในอุปกรณ์การสื่อสารต่างๆ ที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงๆ ทั้งนี้เพราะโลหะผสมประเภทนี้จะมีความแข็งและมีแรงดึงได้สูงกว่าโลหะผสมของทองแดงกับแคดเมียม

3.1.4) แคดเมียมใช้ผสมกับโลหะอื่นในกิจการเพชรพลอย เช่นผสมกับโลหะอื่นชนิดเดียว (ผสมทอง) ผสมกับโลหะอื่น 2 ชนิด (ทอง 75% เงิน 16.6%) ผสมกับโลหะอื่น 3 ชนิด (ทองแดง เงิน และทอง)

3.1.5) ใช้แคดเมียมที่มีความบริสุทธิ์สูงๆ ในการผสมกับโลหะอื่น เพื่อให้มีคุณสมบัติกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เช่น Cadmium Arsenide, Cadmium Antimonide และ Cadmium Telluride

3.2) ใช้ในการชุบโลหะ โดยใช้แคดเมียมเคลือบบนแผ่นเหล็ก ทองแดง อะลูมิเนียม โดยการชุบด้วยไฟฟ้า โลหะที่ได้จากการชุบนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และวิทยุ เป็นต้น

3.3) ใช้เป็นเม็ดสีในกิจการอุตสาหกรรม สารประกอบของแคดเมียมที่ใช้ในการให้สีในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น สีอีนามัล เซรามิก ยาง แก้ว ผ้า เส้นใย หนัง หมึกพิมพ์ และพลาสติก

3.4) ใช้ผลิตแบตเตอรี่ โดยใช้ร่วมกับโลหะนิกเกิลเป็น Cd – Ni Battery ซึ่งนำมาใช้เป็นแบตเตอรี่ในเครื่องคิดเลข แฟลชถ่ายรูป และเครื่องโกนหนวด เป็นต้น

3.5) ใช้ในกิจการอื่นๆ เช่น

3.5.1) ใช้ผสมในสารฆ่าเชื้อรา (Fungicides)

3.5.2) ใช้ในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู เป็นตัวควบคุมอัตราการแตกตัวของนิวเคลียร์

3.5.3) ใช้ในการผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์

3.5.4) ใช้ในกิจการถ่ายรูป

4) การปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ (2541) ได้แบ่งแหล่งที่มาของการแพร่กระจายแคดเมียมไว้ดังนี้

4.1) จากอุตสาหกรรมตะกั่วและสังกะสี ได้แก่ การทำเหมือง การหลอมและถลุง อุตสาหกรรมแคดเมียม ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้จะปล่อยฝุ่น ไอ น้ำเสีย กากตะกอน (Sludge) ที่มีแคดเมียมปนอยู่ออกมา

4.2) จากโรงงานชุบโลหะแคดเมียม ซึ่งของเสียจากโรงงานประเภทนี้จะมีแคดเมียมประมาณ 100 – 500 ppm และมีโลหะหนักอื่น ๆ รวมทั้งไซยาไนด์และสารเคมีอื่น ๆ ผสมอยู่ด้วย

4.3) จาก Primary Iron and Steel Industry และ Secondary Non-ferrous Metal Industry อุตสาหกรรมประเภทนี้จะปล่อยฝุ่น ไอ น้ำเสีย กากตะกอน ที่มีแคดเมียมปนออกมา

4.4) จากการเผาของเสีย (Incineration) การเผาของเสียที่มีแคดเมียมประกอบอยู่ เช่น พลาสติก เม็ดสี โลหะเคลือบ เศษเหล็ก เป็นต้น จะปล่อยแคดเมียมออกมาในรูป Cadmium Aerosols เช่น Cadmium Oxide (CdO)

4.5) จากยางรถยนต์ที่สึกหรอ ยางรถยนต์จะมีแคดเมียมประกอบอยู่ประมาณ 20 – 90 ppm โดยเป็นสิ่งเจือปน (Impurity) ใน Zinc Oxide ซึ่งเป็นสารรักษาความเง่ง

4.6) จากปุ๋ยฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟตมีแคดเมียมอยู่เนื่องจากหินฟอสเฟตที่เป็นวัตถุดิบมีแคดเมียมประมาณ 2 – 170 ppm มีรายงานว่าการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตจะไปเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดินเพราะ cadmium phosphate ละลายน้ำได้น้อย และส่วนที่ไม่ละลายพืชไม่สามารถดูดซึมได้ ดังนั้นแคดเมียมส่วนนี้จึงสะสมอยู่ในดิน แต่ถ้ามีการใช้ปุ๋ยแอมโมเนียร่วมกับ แคดเมียมจะละลายได้มากขึ้น เนื่องจากแคดเมียมจะไปรวมตัวกับแอมโมเนียเป็นอออนอิสระที่ละลายน้ำได้ คือ $\text{Cd}(\text{NH}_3)_2^{+2}$ และ $\text{Cd}(\text{NH}_3)_4^{+2}$

4.7) จากการใช้ถ่านหิน และ Heating Oil แคดเมียมเป็นธาตุปริมาณน้อยใน Fossil Fuels ดังนั้น เมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงเหล่านี้ แคดเมียมจะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของไอและเถ้า ปริมาณแคดเมียมในถ่านหินอยู่ในช่วง 0.25-5 ppm และพบในเถ้าถ่านหิน (Coal Ash) มีปริมาณแคดเมียมสูงถึง 150 ppm ส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมโดยเฉลี่ยใน Heating Oil ประมาณ 0.3 ppm

4.8) จากกากตะกอนของน้ำทิ้ง (Sewage Sludge) กากตะกอนจากโรงงานกำจัดน้ำเสีย มีปริมาณแคดเมียมค่อนข้างสูง และการใช้กากตะกอนเหล่านี้เพื่อเป็นปุ๋ย จะเป็นการเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดิน ได้มีการคำนวณว่าจากการใช้ Sewage Sludge (ที่มี Cd ประมาณ 20 ppm หรือมากกว่า) จำนวน 2-3 ตันต่อปี ใส่งในพื้นที่ยาสูบที่ยังไม่มีปัญหามลพิษ (Unpolluted Agriculture Soils ซึ่งมี Cd <0.1–0.5 ppm) จะไปเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดินยาสูบนี้เป็น 1.2-6 ppm และพบว่าพืชบางชนิด เช่น ข้าว ข้าวสาลี สามารถดูดซึมแคดเมียมจากดินได้ดี

4.9) จากการสึกกร่อนของสังกะสี (Corrosion of Zinc) แคดเมียมเป็นสิ่งเจือปนในสังกะสี เมื่อโลหะหรือภาชนะที่ชุบสังกะสีเกิดการสึกกร่อน แคดเมียมก็จะแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

4.10) ยาสูบ (Tobacco) จากการสูบบุหรี่พบว่า มีแคดเมียมออกสู่บรรยากาศ 1.4 ไมโครกรัมต่อบุหรี่ 1 มวน

5) ความเป็นพิษของแคดเมียม

5.1) ความเป็นพิษต่อพืช

สิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิดมีความสามารถสะสมแคดเมียมไว้ในร่างกายได้ เนื่องจากแคดเมียมมีคุณสมบัติทางเคมีที่คล้ายกับสังกะสี ทำให้แคดเมียมสามารถเข้าไปแทนที่สังกะสีในเอ็นไซม์บางชนิด ด้วยเหตุนี้ทำให้เมตาบอลิซึม (Metabolism) ถูกทำให้เปลี่ยนไปจากปกติ (ศิริมาศ สิทธิกรม, 2550) โดยพบว่า แคดเมียมปริมาณเพียงเล็กน้อยจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช (Francis, 1994) ถ้าปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือดินของพืชอยู่ในช่วง 5-700 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยน้ำหนักแห้งแล้วจะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช (Chaney, 1982) และจะไปมีผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมของพืช ยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสง กระบวนการคายน้ำของพืช ลดปริมาณคลอโรฟิลล์ ทำให้คลอโรพลาสต์ผิดปกติ (Peligard, 1986) ซึ่งความรุนแรงของอาการเป็นพิษขึ้นอยู่กับชนิดและความทนทานของพืชชนิดนั้นๆ และนอกจากนี้พบว่าแคดเมียมมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของพืชอาหารสัตว์ โดยพบว่าเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของแคดเมียมลงไปในดิน มีผลทำให้การเจริญเติบโตของหญ้าขนลดลงทั้งในส่วนของลำต้นและราก และพบว่าหญ้าขนนั้นสามารถทนความเป็นพิษของแคดเมียมโดยไม่กระทบต่อการเจริญเติบโตได้ถึง 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (อรุวรรณ ศิริรัตน์พิสัย, 2522)

5.2) ความเป็นพิษต่อสัตว์

สำหรับสัตว์ที่ได้รับแคดเมียมประมาณ 1,300 ไมโครกรัมต่อวันจะเกิดโรคโลหิตจาง ความดันโลหิตสูง อัตราการเจริญเติบโตช้าและมีอายุสั้น (ไมตรี สุทธิจิตร, 2531) ซึ่งการแสดงความเป็นพิษต่อสัตว์นั้น จะขึ้นอยู่กับชนิด ขนาดของสัตว์ ปริมาณของแคดเมียม และกระบวนการที่ได้รับ เช่น หอยน้ำดินจะมีการสะสมแคดเมียมในระดับสูงในตับและทางเดินอาหารมากกว่าเปลือกกล้ามเนื้อ หรืออวัยวะภายใน (Bagatte and Alikaham, 1978) ความเข้มข้นของแคดเมียมในสัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก (*Hyla laevis*) มีปริมาณ 1.0-51.3 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (Bagatte and Alikaham, 1978; Wren et al., 1983) ปริมาณแคดเมียมในปลาน้ำจืดในแคนาดาจะมีน้อยกว่า 0.4 ไมโครกรัมต่อกรัม (Wren et al., 1983) สำหรับความเป็นพิษที่มีต่อปลานั้นจะ

แตกต่างกันไปในแต่ละระยะการเจริญเติบโต โดยที่ระยะตัวอ่อนและระยะ Newlyhatched Alevins มีความทนทานต่อพิษได้ดีกว่าระยะ Older Alevins หรือระยะ Juveniles (Chapman, 1978) การศึกษาผลของแคดเมียมที่มีต่ออกพบว่า นกที่มีอายุน้อยจะมีความไวต่อแคดเมียมมากกว่านกที่อายุสูงกว่า จากการทดลองให้อาหารที่มีแคดเมียมปริมาณ 200 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง กับเป็ดป่าระยะเต็มวัยเป็นระยะเวลา 8.5 สัปดาห์จะทำให้เกิดภาวะ Kidney Lesions (White et al., 1978) แต่ในลูกเป็ดแคดเมียมในปริมาณ 20 ไมโครกรัมต่อกรัม ในระยะเวลาที่เท่ากันจะมีผลทำให้เกิดอาการดังกล่าวร่วมกับอาการโลหิตจางได้ (Chain et al., 1983) สำหรับการศึกษาในสัตว์ป่าพบว่าลักษณะทางคลินิกของความเป็นพิษของแคดเมียมที่สำคัญคือ การเกิดโรคโลหิตจางเกิดการพัฒนารวมของต่อมสืบพันธุ์ล่าช้า โรคข้อต่อมีการขยายตัว โรคไตและตับถูกทำลาย และการเจริญเติบโตลดลง ซึ่งเป็นลักษณะที่คล้ายคลึงกับการขาดธาตุสังกะสี (Hoffman et al., 1995)

5.3) ความเป็นพิษต่อมนุษย์

ลักษณะความเป็นพิษจากการรับสัมผัสแคดเมียม สามารถจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ

5.3.1) ความเป็นพิษเฉียบพลัน เกิดจากการหายใจเอาไอหรือฝุ่นของแคดเมียมที่มีอยู่ในบรรยากาศ เป็นจำนวนมากเข้าไป อาการที่พบคือ เกิดความระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการไอ เจ็บหน้าอก หายใจสั้น มีกลิ่นโลหะในปาก ไอมีเสมหะเป็นฟองหรือมีเสมหะเป็นเลือด อ่อนเพลีย ปวดขา ต่อมาการถ่ายปัสสาวะจะน้อยลง เริ่มมีไข้ มีอาการของปอดอักเสบ มีเหงื่อออกและสั่น แคดเมียมเมื่อเข้าสู่ร่างกายโดยการกิน (ตารางที่ 2.2) ก็เกิดอาการคลื่นไส้ ปวดท้อง อาเจียน ท้องเสีย ปวดศีรษะ ปวดกล้ามเนื้อ มีน้ำลายไหล ช็อก ไตและตับถูกทำลาย มีอาการเหมือนอาหารเป็นพิษ ดังนั้นจึงห้ามใช้แคดเมียมชกบกระป๋องอาหาร เพราะหากได้รับสารแคดเมียมเข้าไปในจำนวนมากๆ ในระยะเวลาอันสั้นแล้วจะมีความเป็นพิษต่อได้ถึงขั้นไตวายได้

5.3.2) ความเป็นพิษเรื้อรัง เกิดจากการได้รับแคดเมียมไม่ว่าจะเป็นการหายใจ การรับประทานหรือการดูดซึมเข้าทางผิวหนัง อาการพิษเรื้อรังจากการหายใจ มีอาการไอ สูญเสียการรับกลิ่น น้ำหนักลด โลหิตจาง (Anemia) หายใจลำบาก แคดเมียมส่วนหนึ่งจะไปเคลือบอยู่ตามเหงือกและคอพิน ทำให้ฟันมีคราบเปื้อนสีเหลืองซึ่งล้างไม่ออก ตับและไตอาจถูกทำลาย เมื่อแคดเมียมเข้าสู่ระบบการไหลเวียนของโลหิตแล้วก็จะไปทำลายปอดทำให้ปอดบวม นอกจากนี้ยังมี

อาการเจ็บหัวเข่าและปวดตามกระดูกทั่วร่างกาย มีปัสสาวะสีชาวเข้ม เนื่องจากไตถูกทำลาย ปริมาณปัสสาวะและเลือดผู้ป่วยเปลี่ยนไป

ตารางที่ 2.2 ความเป็นพิษแบบเฉียบพลันของแคดเมียมที่มีต่อมนุษย์โดยการกิน

ปริมาณแคดเมียม (มิลลิกรัม)	อาการที่เกิดขึ้น
3-90	เกิดอาการอาเจียน แต่ไม่มีผลทำให้ถึงตาย
15	เกิดการอาเจียน
10-326	เกิดอาการความเป็นพิษอย่างรุนแรงแต่ไม่ถึงตาย
350-3500	ปริมาณที่อาจจะทำให้ถึงตายได้
1530-8900	ปริมาณที่ทำให้ตายได้

หมายเหตุ โดยสรุปอย่างคร่าว ๆ ปริมาณที่ไม่มีผลต่อร่างกายแบบเฉียบพลันเมื่อกินเข้าไป ครั้งเดียวคือ 3 มิลลิกรัม

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2541)

2.1.2 สังกะสี (Zinc)

1) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสังกะสี

สังกะสี (Zn) เป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ IIB ในตารางธาตุ (Periodic Table of Elements) เป็นโลหะอ่อนสีน้ำเงินขาว โดยสังกะสีมีคุณสมบัติแสดงได้ดังตารางที่ 2.3 ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของสังกะสี

คุณสมบัติ	รายละเอียด
สูตรทางเคมี	Zn
เลขอะตอม	30
น้ำหนักอะตอมหรือโมเลกุล	65.38 amu
ความถ่วงจำเพาะ	7.14
จุดหลอมเหลว	419.5 °C
จุดเดือด	907 °C
ความดันไอ ที่ 100 °C และ 1,000 °C	1,023 P/Pa และ 1,125 P/Pa
การละลาย	ละลายได้ดีในกรดอ่อนหรือด่างแก่ หากละลายในกรดจะทำให้เกิดแคตไอออน Zn^{2+} หรือ หากละลายในเบสจะทำให้เกิด $Zn(OH)_2$ ซึ่งจะละลายน้ำได้น้อยลงเรื่อยๆ
การออกซิไดซ์	สังกะสีมีความคงทนต่อการทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศได้ดี

2) แหล่งที่มาของสังกะสี

ในธรรมชาติจะพบสังกะสีในหินอัคนีอยู่ในช่วง 5-1,070 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หินปูนน้อยกว่า 1-180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หินทราย 5-170 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดิน 1-900 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Bowen, 1979) โดยทั่วไปแล้วจะพบสังกะสีในรูป ZnS , Zn_2SiO_4 , $ZnCO_3$ และ $Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$ และเมื่อนำแร่สังกะสีไปถลุงจะได้แร่อื่นที่ปนอยู่ออกมาด้วย เช่น แร่เหล็ก (Fe) แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) (Adriao, 2001) สำหรับในประเทศไทยจะพบสังกะสีในรูป $Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$ และ $ZnCO_3$ (ศักดิ์สินทร์ ธีรพันธุ์เสถียร, 2538) การสลายตัวของแร่สังกะสีทำให้ได้สังกะสีในรูป Zn^{2+} ซึ่งเคลื่อนย้ายได้ดีในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด แต่เมื่ออยู่ในดินจะถูกดูดซับโดยแร่และสารอินทรีย์จึงพบการสะสมของสังกะสีได้ในผิวดินชั้นบน รูปของสังกะสีที่พบได้มากที่สุด在地ดินคือรูป Zn^{2+} (ศศิธร ใฝ่สังจะธรรม, 2549)

3) การนำสังกะสีมาใช้ประโยชน์

สังกะสีถูกนำไปใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรม ดังนี้

- 3.1) ใช้ประโยชน์ในรูปของโลหะเจือ เช่นเดียวกับทองแดง (Cu) และอะลูมิเนียม (Al) ในการผลิตแผ่นโลหะเจือ
- 3.2) ใช้เคลือบผิว (Galvanizing) เหล็กกล้าเพื่อป้องกันการขึ้นสนิมของเหล็กกล้า
- 3.3) ใช้เติมในยางและสี
- 3.4) ใช้เติมในส่วนผสมของยา เช่น ยารักษาโรคผิวหนัง ยาฆ่าเชื้อโรค
- 3.5) ใช้เป็นสารคลุกเมล็ดกันเชื้อรา

นอกจากนี้ สังกะสียังเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของมนุษย์และสัตว์ รวมทั้งเป็นจุลธาตุอาหารที่สำคัญในการเจริญเติบโตของพืช โดยมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับฮอร์โมนพืช มีส่วนในการขยายพันธุ์พืชบางชนิด มีบทบาททางอ้อมในการสร้างคลอโรฟิลล์ และเป็นตัวปลูกฤทธิ์ของเอนไซม์หลายชนิด เช่น Carbonic, Anhydrase, Alcohol, Dehydrogenase และ Peptidase หลายชนิด (คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา, 2548)

4) การปนเปื้อนของสังกะสีในสิ่งแวดล้อม

การปนเปื้อนสังกะสีในดินมีแหล่งกำเนิดมาจาก 4 แหล่ง (Alloway, 1990) คือ

- 4.1) วัตถุดิบกำเนิดดิน ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีขึ้นอยู่กับชนิดของหินแร่ที่เกิดจากกระบวนการผุพังในพื้นที่บริเวณนั้น ๆ ความเข้มข้นของสังกะสีที่พบในดินทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง 10-300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Donald and Trantolo, 1994)
- 4.2) การปนเปื้อนจากบรรยากาศ เช่น การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านหิน

4.3) การทดลองพบว่า ตะกอนในอ่าวเวปนเซอร์ ประเทศออสเตรเลีย ที่อยู่ใกล้โรงงาน ถลุงแร่สังกะสีมีการปนเปื้อนสังกะสีสูงกว่าปริมาณปกติถึง 30 เท่า (Dossis and Warren, 1981)

4.4) การใช้กากตะกอนน้ำเสีย (Sewage Sludge) ในด้านการเกษตรกากตะกอนน้ำเสีย ในแต่ละแหล่งที่มาจะมีความเข้มข้นของสังกะสีที่แตกต่างกัน ในบางประเทศได้กำหนดความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ของสังกะสีในกากตะกอนน้ำเสียที่จะนำมาใช้ในการเกษตร เช่น ในกลุ่มสหภาพยุโรป (EU) และประเทศอิตาลี กำหนดค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ของธาตุสังกะสีในกากตะกอนน้ำเสียที่จะมาใช้ในการเกษตร มีค่าเท่ากับ 150-300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) และ 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ (Moolenarr and Beltrami, 1998)

5) ความเป็นพิษของสังกะสี

5.1) ความเป็นพิษต่อพืช

พืชแต่ละชนิดจะแสดงอาการเป็นพิษต่อสังกะสีในระดับที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปถือว่าสังกะสีที่สกัดได้โดยกรดอะซิติกในประมาณเกิน 60 ppm เป็นระดับที่เริ่มเป็นพิษ แต่พืชหลายชนิดอาจจะยังไม่แสดงอาการเป็นพิษจนสังกะสีมีปริมาณถึง 200 ppm (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) พืชที่ได้รับสังกะสีมากเกินไปจะก่อให้เกิดความเป็นพิษ โดยแสดงอาการที่เด่นชัด คือ รากหยุดการเจริญเติบโต ใบอ่อนจะเหลืองซีดซึ่งเป็นอาการขาดเหล็กในสภาวะที่มีสังกะสีมากเกินไป เนื่องจากธาตุทั้งสองมีขนาดของไฮเดรตไอออนใกล้เคียงกันจึงเป็นปฏิปักษ์ต่อกัน กล่าวคือ ถ้าพบความเข้มข้นของสังกะสีในดินมากจะส่งผลทำให้รากพืชดูดเหล็กได้น้อยลง (Boardman and McGuire, 1990)

5.2) ความเป็นพิษต่อสัตว์

สำหรับความเป็นพิษของสังกะสีต่อสัตว์นั้น พบว่า สังกะสีสามารถทำลายเซลล์บริเวณเหงือกของปลา และมีผลต่อการวางไข่และตัวอ่อนปลา นอกจากนี้สังกะสียังมีผลต่อการเจริญเติบโตของปลา ทำให้การเจริญเติบโตของปลาช้าลง อีกทั้งยังสามารถฆ่าหอย ได้ที่ระดับความเข้มข้น 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร จนถึงที่ระดับความเข้มข้นสูงถึง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (Portmann, 1972 อ้างถึงใน ศศิธร ใฝ่สัจจะธรรม, 2549)

5.3) ความเป็นพิษต่อมนุษย์

ร่างกายมนุษย์เมื่อได้รับสังกะสีปริมาณที่มากจนเกิดสภาวะเป็นพิษ จะส่งผลต่อการทำงานของระบบควบคุมหรือระบบการเมแทบอลิซึม (Metabolism) ในร่างกายและก่อให้เกิดมะเร็ง (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) โดยสังกะสีสามารถเข้าสู่ร่างกายโดยการปนเปื้อนในอาหารที่รับประทานหรือทางการหายใจ โดยส่วนใหญ่ถูกสะสมไว้ที่ตับและไต ถ้าร่างกายได้รับสังกะสีในปริมาณมากจะมีความผิดปกติ เช่น ปวดท้อง อาเจียน คลื่นไส้ ช็อก ความต้านทานโรคต่ำกว่าปกติ บาดแผลปิดยาก และอาจเสียชีวิตได้ (Berman, 1980)

2.1.3 มาตรฐานของแคดเมียมและสังกะสีในดิน

ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในดินที่ยอมรับได้ (Maximum Permitted Concentration) คือ ค่ากำหนดมาตรฐานความปลอดภัยของโลหะหนักที่อนุญาตให้มีปริมาณสูงสุดทั้งในดินและวัสดุที่ใช้เพื่อปรับปรุงดินในการเกษตร รวมทั้งปริมาณสะสมหรือตกค้างที่พบในดินหลังการใช้วัสดุดังกล่าว ซึ่งในแต่ละประเทศ เช่น สมาชิกสหภาพยุโรป เยอรมัน ออสเตรเลีย อังกฤษ แคนาดา สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และ ไทย ได้มีการกำหนดระดับมาตรฐานของแคดเมียมและสังกะสีในดินแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของแคดเมียมและสังกะสีในดินที่ยอมรับได้ในบางประเทศ

ประเทศ	ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของแคดเมียมและสังกะสีในดินที่ยอมรับได้ในบางประเทศ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	
	สังกะสี	แคดเมียม
กลุ่มสหภาพยุโรป (EU)	300	3
อังกฤษ	280	1-3
เยอรมัน	300	3
ฮอลแลนด์	200-500	1-5
ญี่ปุ่น	150	-
ไทย	-	37

ที่มา: ดัดแปลงจากปริตดา พากเพียร และคณะ (2541) และทัศนีย์ อัดตนันท์ (2543)

2.1.4 การสะสมโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม (ศศิธร ใฝ่สัจจะธรรม, 2549)

1) การสะสมโลหะหนักในดิน

จากการผูกพันและการสลายตัวของวัตถุต้นกำเนิดดิน ทำให้พื้นผิวโลกมีการสะสมโลหะหนักอยู่ในปริมาณหนึ่ง ซึ่งความเข้มข้นของโลหะหนักในเปลือกโลกและในดินมีค่าผันแปรได้ตามลักษณะวัตถุต้นกำเนิดดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน เนื้อดิน และระดับความลึกของดิน ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่จะมีการเคลื่อนย้ายได้น้อย เนื่องจากมีความสามารถในการยึดเกาะอยู่ในส่วนที่เป็นอนุภาคดินเหนียว (Clay Fraction) ได้ดี ดินที่เป็นดินเหนียวจึงมีโลหะหนักอยู่ในรูปที่ดูดีได้ง่าย (Available Form) ในสารละลายดินน้อยกว่าดินที่เป็นดินทรายซึ่งมีส่วนที่เป็นอนุภาคดินเหนียว (Clay Fraction) น้อย ดังนั้นโลหะหนักส่วนใหญ่จึงอยู่ในสารละลายดินของดินทรายมากกว่าดินเหนียว (Diaz และ Polo, 1988) เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักพบว่า โลหะหนักที่เคลื่อนย้ายได้ง่ายคือ นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี โลหะหนักที่เคลื่อนย้ายได้ปานกลาง คือ ทองแดง ส่วนโลหะหนักที่เคลื่อนย้ายได้น้อยหรือไม่เคลื่อนย้ายเลย คือ ตะกั่ว ปรอท และโครเมียม

2) การสะสมโลหะหนักในพืช

พืชสามารถสะสมโลหะหนักทั้งจากดิน น้ำ และอากาศ เพราะโลหะหนักสามารถเข้าสู่พืชได้ทั้งทางราก ลำต้น และใบ กระบวนการดูดตั้งและสะสมโลหะหนักของรากพืชอาจเป็นแบบ Active Ion Absorbtion หรือ Passive Ion Absorbtion ซึ่งกลไกการดูดตั้งแบบ Passive Ion Absorbtion อาจดูดตั้งโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) หรือวิธีการคายน้ำ (Convection) กลไกนี้เกิดขึ้นในขณะที่พืชดูดน้ำเพื่อทดแทนการคายน้ำ เมื่ออัตราการดูดไอออนเร็วเกินกว่าอัตราการคายน้ำจะทำให้เกิดสภาวะ Concentration Gradient อย่างกะทันหัน ที่บริเวณรากพืช โลหะหนักจึงเคลื่อนเข้าได้ โดยวิธีการแพร่จากดินสู่รากพืช ส่วนวิธีการเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากรากไปสู่ยอด (Translocation) ยังสรุปแน่นอนไม่ได้ (Culter and Pains, 1974)

2.2 การบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation)

การบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation) เป็นเทคโนโลยีชนิดหนึ่งที่ใช้พืชดูดตั้งธาตุโลหะหนักและสารพิษที่ตกค้างในดินไปสะสมไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช (Brown et al., 1995) ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งวิธีการนี้ได้รับความสนใจในการศึกษากันมาก เนื่องจากมีวิธีการที่ไม่ยุ่งยากและไม่ซับซ้อน สามารถช่วยลดมลพิษในสิ่งแวดล้อมโดยไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย โลหะหนักและสารพิษในดินที่พืชได้รับจะมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในต้นพืชทำให้เกิดการทนทานต่อสารนั้นๆ โดยมีเอนไซม์บางตัวถูกกระตุ้นให้แสดงออกเมื่อได้รับธาตุโลหะหนักทำให้สังเคราะห์สารบางชนิดขึ้นมาจับกับไอออนของโลหะหนัก แล้วนำมาเก็บสะสมไว้ (Phytoextraction) หรือย่อยสลายสารพิษ (Phytodegradation) หรือเปลี่ยนสภาพ และลดความเป็นพิษ (Phytostabilization) หรือเปลี่ยนสภาพเป็นสารระเหยสู่อากาศ (Phytovolatilization) (มาลินี สุขแสงพนมรุ่ง, 2544) จากกลไกตามธรรมชาติของพืชที่สามารถกำจัดโลหะหนักและสารพิษในดินนี้เอง จึงได้นำพืชมาใช้บำบัดและได้มีการศึกษากันมาก เพื่อค้นหาพืชที่มีความทนทานและสามารถดูดตั้งธาตุโลหะหนักและสารพิษในดินให้มีปริมาณการสะสมในพืชมากที่สุด สำหรับพืชที่เหมาะสมในการนำมาลดการปนเปื้อนของโลหะหนักในดิน ควรเป็นพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักในลำต้นได้สูงสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก มีความทนทานเป็นพืชที่ง่ายต่อการปลูกและดูแลรักษา มีวงจรชีวิตสั้น สามารถขยายพันธุ์ได้ดี มีปริมาณมวลชีวภาพมาก และต้องเป็นพืชที่กินไม่ได้ (Non-edible) ทั้งคนและสัตว์ อันเป็นการป้องกันการกระจายตัวของสารพิษและป้องกันอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของสิ่งมีชีวิตต่างๆ (Sampanpanish et al., 2006)

2.2.1 ประเภทของการบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation)

วิธีการบำบัดโดยพืชมีหลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามกลไกของพืชที่ใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ ได้ดังนี้ (USEPA, 2000)

1) Phytoextraction หรือ Phytoaccumulation คือ การดูดซับสารปนเปื้อนโดยอาศัยรากพืชและส่งผ่านสารขึ้นไปสู่ส่วนของลำต้นพืช ซึ่งสารปนเปื้อนจะสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อพืชทั้งในส่วนของรากและส่วนต่างๆ ของพืช หลังจากนั้นจะทำการเก็บเกี่ยวพืชที่ดูดซับสารปนเปื้อนออกไป ซึ่งตัวกลางที่สามารถใช้วิธีการนี้ได้แก่ ดิน และตะกอนดิน สารโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ เช่น แคดเมียม โครเมียม ทองแดง ปรอท ตะกั่ว และสังกะสี เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถบำบัดสารกัมมันตรังสีได้ เช่น สตรอนเชียม-90 (^{90}Sr) ซีเซียม-137 (^{137}Cs) พลูโทเนียม-239 (^{239}Pu) และยูเรเนียม-238 (^{238}U) (จันทน์ แจ่มแสงทอง, 2550)

2) Rhizofiltration คือ การใช้รากพืชในการดักกรอง หรือดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำ เช่น น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และน้ำเสีย การบำบัดวิธีการนี้จะทำให้สารปนเปื้อนไม่มีการเคลื่อนที่หรือเกิดการสะสมในบริเวณราก ซึ่งสารปนเปื้อนจะถูกกำจัดออกไปโดยการเก็บเกี่ยวพืช สำหรับสารโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล สังกะสี และโครเมียม สำหรับสารกัมมันตรังสีที่สามารถบำบัดโดยวิธีนี้ เช่น ^{137}Cs และ ^{238}U

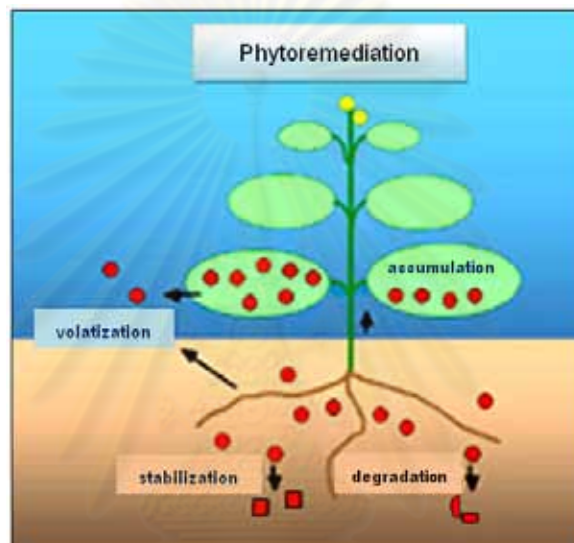
3) Phytostabilization คือ การใช้พืชเพื่อยับยั้งหรือลดการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในดิน ตะกอนดิน หรือตม โดยการใช้รากพืชเพื่อจำกัดการเคลื่อนที่และการดูดซับไว้ในราก ทำให้สารปนเปื้อนต่างๆ ภายในตัวกลางเกิดการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียร เกิดการตกตะกอนในบริเวณรากพืช สำหรับสารปนเปื้อนที่สามารถใช้วิธีการนี้ คือ โลหะหนัก

4) Rhizodegradation หรือเรียกว่า Biodegradation, Rhizosphere, Phytostimulation เป็นต้น คือ การกำจัด หรือการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในดิน ตะกอน กากตะกอน น้ำผิวดิน และ น้ำใต้ดิน ด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ ซึ่งรากพืชจะมีการปล่อยเอนไซม์ออกมากระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ในบริเวณนั้น ทำให้สารปนเปื้อนเหล่านั้นถูกย่อยสลาย

5) Phytodegradation หรือ Phytotransformation คือ การทำให้สารปนเปื้อนมีการเปลี่ยนรูป โดยการใช้เอนไซม์ของพืช หรือกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolic) ของพืช ทำให้สารปนเปื้อนที่

มีโมเลกุลใหญ่เปลี่ยนไปเป็นโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งพืชนั้นๆ สามารถนำไปสร้างเนื้อเยื่อของพืช ตัวกลางที่สามารถใช้วิธีการนี้ในการบำบัดได้แก่ ดิน ตะกอน กากตะกอน น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน

6) Phytovolatilization คือ การใช้พืชในการดูดซับสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในดิน หรือในน้ำ และด้วยกลไกที่เกิดขึ้นในต้นพืชจะทำการเปลี่ยนแปลง (Transformation) สารปนเปื้อนให้อยู่ในรูปที่ระเหยได้และมีความเป็นพิษลดลงจากเดิม หลังจากนั้น สารปนเปื้อนที่อยู่ในรูปที่ระเหยได้สามารถกำจัดออกโดยผ่านทางใบพืช



รูปที่ 2.1 ประเภทของการบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation)

ที่มา: <http://rydberg.biology.colostate.edu/epsmitlab/>

2.2.2 ข้อดีและข้อจำกัดของการบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช

(Phytoremediation) (สุธินี วดีศรีศักดิ์, 2550 อ้างถึงในทิพวรรณ พจนามรณ)

1) ข้อดีของการบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation)

1.1) Phytoremediation เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสม ในการนำมาใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่บริเวณกว้าง เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างมีค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อเทียบกับ การบำบัดดินโดยวิธีการอื่นๆ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้การบำบัดโดยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายต่ำ เนื่องจากอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหลัก ไม่มีการเคลื่อนย้ายดินออกจากพื้นที่ นอกจากนี้ การบำบัดโดยวิธีนี้ยังมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อยหรือไม่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเลย จึงมีความปลอดภัยมากกว่าวิธีการอื่นๆ

1.2) Phytoremediation กับพืชที่เป็น Hyperaccumulator Species นอกจากจะสามารถบำบัดโลหะหนักออกจากดินแล้ว ยังสามารถนำโลหะที่สกัดได้จากมวลชีวภาพไปผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่หรือนำมาขาย และการเผาผลาญชีวภาพยังสามารถนำเอาพลังงานที่ได้มาใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ ถ้าไรที่ได้จากการขายโลหะหนักเหล่านั้นยังสามารถนำมาเป็นต้นทุนในการปลูกพืชในครั้งต่อไปได้อีกด้วย

1.3) Phytoremediation เป็นการปลูกพืชลงในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน ซึ่งพืชเหล่านั้นยังช่วยลดการพังทลายของดิน ช่วยป้องกันการแพร่กระจาย หรือลดการปนเปื้อนของโลหะหนักไปยังพื้นที่อื่นๆ หรือลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงในการที่สารปนเปื้อนเหล่านั้นจะเข้าสู่มนุษย์และสัตว์ได้ นอกจากนี้ พืชที่ปลูกยังสร้างสารอินทรีย์ที่มีส่วนช่วยในการพัฒนาเนื้อดิน และความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน และหากพืชมีความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ที่นำมาบำบัดแล้ว จะส่งผลให้พื้นที่ที่บำบัดมีสภาพที่ดีขึ้น ร่มรื่น ทำให้เกิดทัศนียภาพที่สวยงามแก่ผู้พบเห็น

1.4) พืชที่มีการสะสมของสารปนเปื้อนเอาไว้ในปริมาณมากๆ จะช่วยทำให้พืชนั้นสามารถรอดพ้นจากการถูกกัดกินของแมลง เช่น หนอนผีเสื้อ เป็นต้น

2) ข้อจำกัดของการบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนโดยพืช (Phytoremediation)

2.1) Phytoremediation ไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ลึกลงไปกว่าบริเวณรากพืชได้ นอกจากนี้ หากสารปนเปื้อนไม่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซับได้ก็ไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารนั้นๆ ได้

2.2) Phytoremediation จะขึ้นอยู่กับสภาพทางธรณีวิทยา สภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิที่ตั้งของแหล่งบำบัด ความสูงจากระดับน้ำใต้ดิน และความสามารถของเครื่องมือทางเกษตรกรรม เป็นต้น

2.3) พืชแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อนแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาเพื่อคัดเลือกพืชที่มีความเหมาะสมในการบำบัดเป็นกรณีไป นอกจากนี้ในปัจจุบันยังขาดพืชที่มีความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อนอีกมากจึงต้องมีการศึกษาต่อไป

2.4) Phytoremediation เป็นเทคนิคที่ขึ้นอยู่กับความสามารถของพืช และใช้ระยะเวลา นาน ในบางครั้งจึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปแก้ปัญหาการปนเปื้อนที่ต้องการแก้ไขในเวลาสั้นได้

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมโลหะหนักในดินและพืช

2.3.1) ชนิดของโลหะหนัก โลหะหนักแต่ละชนิดมีลักษณะในการถูกปลดปล่อยสู่ สารละลายในดิน และถูกดูดเข้าสู่ส่วนต่างๆ ของพืชได้แตกต่างกัน ลักษณะของปฏิกริยาร่วม ระหว่างโลหะหนักด้วยกันมี 2 อย่าง คือ การแก่งแย่ง (Antagonism) และการดูดยึดด้วยกัน (Synergism) (ทศนีย์ อุตตะนันท์, 2543) ซึ่งปฏิกริยาทั้ง 2 อย่างนี้จะมีอิทธิพลต่อสารละลายในดิน การดูดตั้งและการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักของพืช เช่น เมื่อมีการเติมกำมะถันลงในดินที่มีการ ปนเปื้อนแคดเมียม ทำให้พืชดูดตั้งแคดเมียมได้เพิ่มขึ้น (Yanshan, 2004) นอกจากนี้ การมี แคลเซียมและสังกะสีในดินจะช่วยลดการดูดตั้งแคดเมียมของพืช (อรรวรรณ ศิริรัตน์พิสัย, 2522) เป็นต้น

2.3.2) ลักษณะสมบัติของดิน มีผลต่อการดูดตั้งโลหะหนักของพืช คือ สภาพการละลาย อันบ่งบอกถึงสภาพการขาดแคลน หรือพืชต่อพืช หรือมีมากจนเป็นสารมลพิษในดิน (ศศิธร ใฝ่ สัจจะธรรม, 2549) สำหรับการเคลื่อนย้ายในสภาพละลาย (ขนาดเล็กกว่า 0.45 ไมครอน) หรือสาร แหวนลอย (ขนาดใหญ่กว่า 0.45 ไมครอน) ซึ่งธาตุโลหะหนักจะอยู่ในสารละลายดิน และสามารถ เคลื่อนย้ายได้ด้วยการแพร่ (Diffusion) การเคลื่อนไปกับการไหลของสารละลายดินหรือโดยการ ไหลของมวล (Mass Flow) ซึ่งจะเกี่ยวพันกับโมเลกุลของน้ำหรือสารลิแกนด์ (Ligand) ซึ่งปัจจัยที่ ควบคุมสภาพการละลายหรือแหวนลอยของโลหะหนัก ได้แก่ ความเข้มข้นของโลหะ ความเข้มข้น ของสารลิแกนด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารประกอบอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็นสารคีเลต (Chelating Agent) รวมทั้งสภาวะของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดิน ศักย์รีดอกซ์ (Redox Potential) และอุณหภูมิดิน (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545)

2.3.3) ชนิดและส่วนต่างๆ ของพืช ปริมาณโลหะหนักในพืชจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ ดินที่ปลูก ชนิดพืช ส่วนต่างๆ ของพืช และอายุพืชแต่ละชนิดจะสะสมโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้ ต่างกัน (นันทกานต์ ชุโนโห, 2549) ตัวอย่างเช่น กระเทียมมีการเคลื่อนย้ายแคดเมียมไปที่หัว และ ยอดเพียงเล็กน้อย โดยในเนื้อเยื่อของกระเทียมมีความเข้มข้นของแคดเมียมในประมาณต่ำ แต่ พบว่าในรากของกระเทียมมีปริมาณแคดเมียมเพิ่มขึ้น (Jiang, Liu และ Hou, 2001)

2.3.4) ความเป็นกรด-ด่าง (PH) ของดิน โดยทั่วไปโลหะหนักจะกระจายตัวได้มากในดินที่มีคุณสมบัติเป็นกรด เนื่องจากง่ายต่อการละลายหรือแลกเปลี่ยนกับไอออนอิสระที่อยู่ในสารละลายดิน ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นในสารละลายดิน และง่ายต่อการดูดซับของพืช (Dudka และ Adriano, 1997) ทั้งนี้พืชจะดูดซับแคดเมียมและสังกะสีได้เพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินลดลง โดยพบว่าดินที่มีความเป็นกรด-ด่าง (pH) น้อยกว่า 5.5 จะทำให้แคดเมียม และสังกะสีถูกปลดปล่อยออกมาจากดินได้มากขึ้น จึงทำให้พืชดูดซับแคดเมียมและสังกะสีได้เพิ่มขึ้น (Römken และ Salomons, 1998)

2.3.5) ปริมาณของอินทรีย์วัตถุ โลหะหนักซึมซับในส่วนประกอบดินได้อย่างมาก เนื่องจากอินทรีย์วัตถุมีประจุลบเป็นจำนวนมาก โดยทั่วไปอินทรีย์วัตถุในดินมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าคอลลอยด์อื่นๆ ตั้งแต่ 2-30 เท่า ในดินทั่วไป ปริมาณของแคดไอออนที่ถูกดูดซับจะอยู่ในช่วงประมาณ 30-90% ของปริมาณที่ดินดูดซับได้ทั้งหมด นอกจากนี้อินทรีย์วัตถุยังมีส่วนที่เป็นประจุบวกอยู่บ้าง จึงสามารถดูดซับแคดไอออนได้ดีอีกด้วย ซึ่งความสามารถในการดูดซับดังกล่าวจะช่วยป้องกันไม่ให้โลหะหนักถูกชะล้างสูญหายไปกับน้ำได้ง่าย ถ้าในดินมีอินทรีย์วัตถุในปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้โลหะหนักออกสู่สารละลายดินน้อยลง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

2.3.6) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน - รีดักชัน หรือศักย์รีดอกซ์ (Oxidation - Reduction Potential; ORP) สภาพศักย์รีดอกซ์ที่ผันแปรในดินเป็นผลมาจากกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์ดิน เมื่อดินมีการระบายอากาศที่ดี จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนจะเจริญได้ดี เมื่ออัตราการหายใจมีมากกว่าอัตราการแพร่กระจายของออกซิเจนบนผิวดินลงสู่ดิน โดยดินจะเริ่มขาดออกซิเจน ซึ่งเมื่อขาดออกซิเจนแล้วกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถใช้สารอื่นแทนออกซิเจนจึงเป็นตัวรีดิวซ์ในกระบวนการหายใจก็จะเจริญเติบโตมากขึ้น มีผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินต่ำลง และค่าศักย์รีดอกซ์ลดลงเช่นกัน (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) ส่งผลให้โลหะหนักสามารถละลายในดินได้มากขึ้น และพืชสามารถดูดซับได้ดีขึ้น

2.3.7) สภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ลักษณะภูมิอากาศ ฤดูกาล มีอิทธิพลในการส่งผ่านโลหะหนักจากรากไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืช (นันทกานต์ ชุนโหระ, 2549) ตัวอย่างเช่น การดูดซับแคดเมียมของข้าวโอ๊ตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิดินสูงขึ้น (Haghiri, 1974) กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้นพืชจะสามารถดูดซับแคดเมียม แมงกานีส และสังกะสีเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Siriratpiriya et al., 1985)

2.3.8) ลักษณะและสมบัติบางอย่างของดิน (ทิพวรรณ พจนานภรณ์, 2552)

1) เนื้อดิน (Soil Texture) เนื้อดินที่แตกต่างกันสามารถทำให้รากของพืชเข้าถึงและดูดตั้งโลหะหนักได้ต่างกัน

2) ความสามารถในการขุดน้ำ (Drainage Status) โดยพบว่า ดินที่สามารถขุดน้ำไว้ได้มาก จะสามารถทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปแบบที่ง่ายขึ้น และพืชสามารถดูดตั้งไปได้มากขึ้นเช่นกัน

3) ความสามารถในการดูดจับโลหะหนัก (Sorptive Capacity) หากดินดูดจับโลหะหนักไว้อย่างแน่นอนแล้วโอกาสที่พืชจะดูดตั้งโลหะหนักไปได้นั้นย่อมลดลงด้วย จึงมักพบว่า พืชสามารถดูดตั้งและเคลื่อนย้ายโลหะหนักได้ดีในดินทรายมากกว่าดินเหนียว

2.4 สารคีเลต (Chelating Agent)

2.4.1 ความหมายของสารคีเลต

คีเลต เป็นคำที่ได้มาจากภาษากรีก มีความหมายว่า “กรงเล็บ” (Claw) เมื่อพิจารณาจากรากศัพท์จะเห็นได้ว่าสารคีเลตชนิดต่างๆ น่าจะเป็นสารที่มีแนวโน้มที่จะยึดแคตไอออนบางอย่าง ซึ่งโอกาสอยู่ร่วมกันอย่างเหนียวแน่นและไม่ยอมให้พวกแคตไอออนเหล่านั้นไปทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ซึ่งมักจะทำให้พวกแคตไอออนเหล่านั้นตกตะกอน ดังนั้นสารคีเลต (Chelating Agent) คือ สารอินทรีย์และอนินทรีย์เคมีซึ่งสามารถจะรวมและค้ำกันไม่ให้มีการตกตะกอนของพวกแคตไอออนบางชนิด รวมทั้งจุลธาตุอาหารที่เป็นบวกทั้งสิ้น คือ เหล็ก แมงกานีส ทองแดง และสังกะสี ปฏิกิริยารวมนี้เรียกว่า Chelation และผลที่ได้จากปฏิกิริยา คือ คีเลต (Chelation) โดยสารคีเลตจะห้อมล้อมแคตไอออนของธาตุที่เป็นโลหะ (Metallic Cation) เข้าไว้จนไม่เปิดโอกาสให้อนุชนิดอื่นๆ เข้าไปเกาะกับโลหะธาตุที่เป็นประจุบวกได้ และทำให้โลหะธาตุที่เป็นองค์ประกอบของคีเลตอยู่ในสารละลายที่มี pH สูงกว่า เมื่อโลหะธาตุเหล่านั้นเป็นแคตไอออนอยู่ในสภาพของสารละลายธรรมดา กล่าวคือ โลหะธาตุในโครงสร้างคีเลตจะเกิดการตกตะกอนเป็นไฮดรอกไซด์ของโลหะได้ยากขึ้น จึงทำให้พืชสามารถดูดตั้งไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น (คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา, 2548)

2.4.2 ประเภทของสารคีเลต (Evangelou et al. 2007)

1) สารอินทรีย์ธรรมชาติ เช่น เอทิลีนไดเอมีนดิสซัคซิเนต (Ethylene Diamine Disuccinate; EDDS) และ ไนทริโลไตรแอซิก (Nitrilotriacetic Acid; NTA) นอกจากนี้การแบ่งสารอินทรีย์ธรรมชาติจากสารกลุ่ม Natural Low Molecular Weight Organic Acid (NLMWOA) เช่น กรดฟีโนลิก (Phenolic Acid; FA) กรดซิตริก (Citric Acid; CA) กรดมาริก (Malic Acid; MA) กรดอะมิโน (Amino Acid; AA) กรดฮิวมิก (Humic Acid; HA) และฟุลวิก (Fulvic Acid; FA) เป็นต้น

2) สารคีเลตสังเคราะห์ เช่น เอทิลีนไดเอมีนเตตระแอซิก (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid; EDTA) ไฮดรอกซีเอทิลีนเตตระแอซิก (Hydroxyethylene Tetraacetic Acid; HEDTA) ไดเอทิลีนไตรอะมิโนเพนทาแอซิก (Diethylene Triamino Pentaacetic Acid; DTPA) และเอทิลีนไกลกอฮอล์เตตระแอซิก (Ethylene Glycol Tetraacetic Acid; EGTA) เป็นต้น

2.4.3 การใช้ประโยชน์ของสารคีเลต

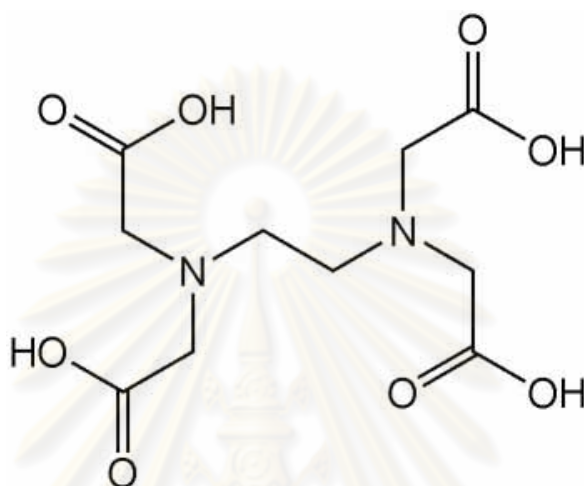
สารคีเลตสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งในครัวเรือน เกษตรกรรม และอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ในอุตสาหกรรมจะนำสารคีเลตมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก เพราะไอออนของโลหะจะสร้างความเสียหายให้กับกระบวนการผลิตในด้านอุตสาหกรรม ทั้งนี้สารคีเลตนั้นจะสามารถเกิดสารเชิงซ้อนกับโลหะหนักได้ จึงนำสารคีเลตมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก นอกจากนี้ยังมีการนำสารคีเลตไปใช้ประโยชน์อีกมากมาย เช่น การนำสารคีเลตมาใช้เป็นส่วนประกอบในน้ำยาทำความสะอาด หรือใช้เป็นสารฟอกขาวสำหรับกระบวนการผลิตกระดาษ เป็นต้น (Oviedo และ Rodriguez, 2003)

2.4.4 สารคีเลตที่เลือกใช้ในงานวิจัย

1) เอทิลีนไดเอมีนเตตระแอซิก (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid; EDTA)

1.1) สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาร EDTA

เอทิลีนไดเอมีนเทตระอะซีติกแอซิด (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid; EDTA) มีลักษณะเป็นเกล็ดหรือผงสีขาว โดยมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.2 และมีสมบัติทางกายภาพและเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของสาร EDTA

ที่มา: Maryadele และ คณะ (2001)

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสาร EDTA

คุณสมบัติ	รายละเอียด
สูตรทางเคมี	$C_{10}H_{16}N_2O_8$
มวลโมเลกุล	292.25 g/mol
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	2.5-3.0
ความหนาแน่นที่ 20 °C	0.86 g/cm ³
จุดหลอมเหลว	240 °C
ความสามารถในการละลายน้ำ	0.05 g/100 ml
ค่า chelation	3.39 mmol/g
การละลายที่ 20 °C	0.4 g/l

ที่มา: Chemical (2003) และ Maryadele และ คณะ (2001)

1.2) ความเป็นพิษของสาร EDTA

สาร EDTA จะไม่มีพิษร้ายแรงต่อมนุษย์ หากหายใจเอาละอองหรือฝุ่นของสาร EDTA เข้าไปก็只会ทำให้ไอหรือจาม การสัมผัสกับผิวหนังหรือลูกตามีผลเพียงทำให้บริเวณที่สัมผัสระคายเคืองและแดงขึ้นเท่านั้น แต่ถ้าหากมีการกินหรือกลืนเข้าไปจะทำให้รู้สึกร้อนในกระเพาะและคลื่นไส้อาเจียน และหากได้รับในปริมาณมากอาจมีผลต่อไตได้ (National Institute for Occupational Safety and Health, 2002) สำหรับความเป็นพิษของสาร EDTA ต่อสัตว์ ได้มีการศึกษาผลของสาร EDTA ในด้านการระคายเคืองต่อผิวหนัง โดยทำการทดสอบกับกระต่าย ในการทดลองได้ใช้ EDTA 50% ในน้ำทาไปหูของกระต่ายเป็นเวลา 20 ชั่วโมง พบว่า กระต่ายเกิดการระคายเคืองเล็กน้อย นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบกับตาของกระต่าย โดยใช้ EDTA 50 มิลลิกรัม เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า กระต่ายเกิดการระคายเคืองที่ตา มีอาการตาพร่ามัว มีอาการบวม น้ำอย่างรุนแรง และมีเลือดออกภายใน 1 ชั่วโมง (BASF AG, 1973) นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาความเป็นพิษของสาร EDTA ต่อพืช เช่น การศึกษาของ Hernandez et al. (2006) ทำการศึกษาผลของ EDTA ต่อการดูดดีงโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม และความเป็นพิษต่อพืชของ EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 4 ระดับ คือ 0, 250, 500 และ 750 ไมโครโมล ทำการทดลองแบบปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponic) ซึ่งพืชที่ใช้ในการศึกษาคือ *Cynara cardunculus* L. โดยมีระยะเวลาที่ใช้เก็บตัวอย่างคือ 48 ชั่วโมง หลังจากปลูกพืชในน้ำเสียสังเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสาร EDTA มากขึ้น พืชมีแนวโน้มแสดงความเป็นพิษมากขึ้น เช่น ลดการปิดเปิดปากใบ ลดอัตราการหายใจ ลดการระเหย และลดการจุน้ำของพืช เป็นต้น

1.3) การสลายตัวของสาร EDTA

Ginkel et al. (1999) ทำการศึกษการย่อยสลายของ EDTA ในน้ำ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากแม่น้ำและทะเลสาบ โดยใช้สาร Na_2EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 6.5 และ 8.0 ทำการทดลองในขวดแบบระบบปิด ผลการศึกษาพบว่า สาร EDTA ที่ pH 6.5 ที่ระยะเวลา 28 วัน ไม่พบการย่อยสลาย หรือพบการย่อยสลายเพียงเล็กน้อยเท่ากับ 2-12% และเมื่อเวลาผ่านไปเป็น 49 วัน พบว่า การย่อยสลายของสาร EDTA มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 60-83% และ สาร EDTA ที่ pH 8.0 ที่ระยะเวลา 28 วัน มีค่าการย่อยสลายของสาร EDTA เท่ากับ 53-72% และ เมื่อการทดลองผ่านไป 35 วัน มีค่าการย่อยสลายของสาร EDTA เท่ากับ 75-89%

Meer et al. (2005) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของสาร EDDS และ EDTA โดยใช้สาร EDTA ที่ความเข้มข้น 0.8, 1.6 และ 4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ทำการศึกษาเป็นระยะเวลา 40 วัน ผลการศึกษาพบว่า การเติมสาร EDTA ที่ระยะเวลา 40 วัน ไม่พบการลดลงของสาร EDTA อย่างมีนัยสำคัญ จากผลการศึกษาดังกล่าวทำให้ Meer และคณะประมาณค่าครึ่งชีวิตของสาร EDTA ได้เท่ากับ 36 วัน

1.4) สาร EDTA กับการบำบัดโลหะหนักในดิน

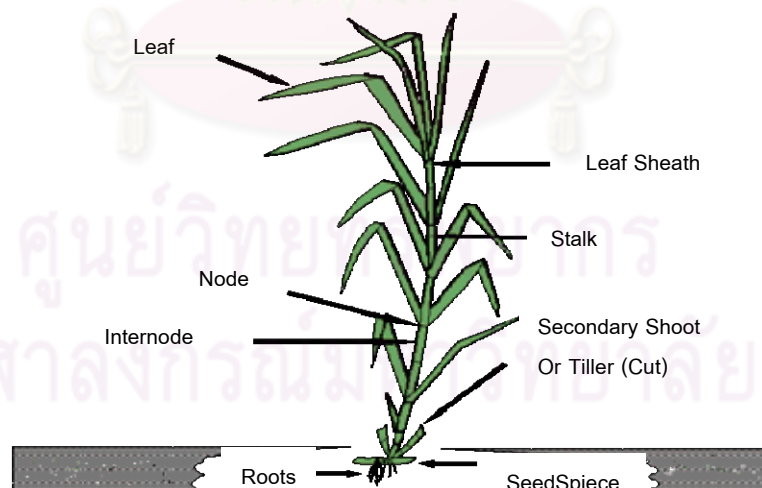
สาร EDTA มีการนำมาใช้ในการบำบัดโดยพืชอย่างกว้างขวางเนื่องจาก พบว่า สาร EDTA สามารถช่วยเพิ่มการดูดซับและสะสมโลหะหนักจากดินโดยพืชได้ (ชิตชนก อัสวโกตี, 2550) เช่นงานวิจัยของ Lai และ Chen (2003) ทำการศึกษาการใช้ EDTA ช่วยในการดูดซับแคดเมียม สังกะสี และตะกั่วด้วยต้นผีเสื้อ (*Dianthus chinensis*) และแฝกหอม (*Vetiver zizanioides*) โดยเติม EDTA ที่ความเข้มข้น 0, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ลงในดินที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม สังกะสี และ ตะกั่ว ที่ความเข้มข้น 20, 500, และ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างคือ 7 และ 14 วัน หลังจากเติม EDTA ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเติม EDTA ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน มีผลทำให้ความเข้มข้นของแคดเมียม และตะกั่ว ในส่วนเหนือดินของต้นผีเสื้อเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่มีนัยสำคัญในการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของสังกะสี ส่วนในหญ้าแฝกพบว่า การเติมสาร EDTA ไม่มีผลในการเพิ่มขึ้นของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด จึงสรุปได้ว่า ต้นผีเสื้อ มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการเคลื่อนย้ายแคดเมียม หรือสังกะสีออกจากดินที่ปนเปื้อน และแฝกหอมมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นพืชควบคุมหรือลดการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักที่อยู่ในดินได้ นอกจากนี้ Epelde et al. (2008) ทำการศึกษาผลของสารคีเลตต่อการสะสมตะกั่วในพืช *Cynara cardunculus* L. และผลของสารคีเลตต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างสารคีเลต 2 ชนิด คือ EDTA และ EDDS ในดินที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 2 ระดับ คือ 2,500 และ 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ระยะเวลาในการปลูกพืช 4 เดือน จากนั้นเติมสารคีเลตลงไปที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ระยะเวลาที่ใช้เก็บตัวอย่างคือ 7 วันหลังจากใส่สารคีเลตแต่ละชนิด ผลการศึกษาพบว่า EDTA มีประสิทธิภาพในการช่วยดูดซับตะกั่วได้มากกว่า EDDS ทั้งใน 2 ระดับความเข้มข้น และการเติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่ว 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีผลให้ตะกั่วไปสะสมในส่วนลำต้นเหนือดิน เท่ากับ 1,332 มิลลิกรัมตะกั่วต่อดิน 1 กิโลกรัมแห้ง ส่วนเมื่อเติม EDDS ลงไปพบว่า ตะกั่วไปสะสมในส่วนลำต้นเหนือดิน เท่ากับ 310 มิลลิกรัมตะกั่วต่อดิน 1 กิโลกรัมแห้ง

2.5 อ้อย

อ้อยเป็นพืชตระกูลหญ้า แหล่งกำเนิดดั้งเดิมของอ้อยอยู่ในนิวกินี ซึ่งเป็นเกาะใหญ่ในมหาสมุทรแปซิฟิก (กรมวิชาการเกษตร, 2523) อ้อยนับเป็นพืชสำคัญอันดับ 4 ของโลก รองจากข้าวสาลี ข้าวโพด และข้าว ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาในแง่ของผลผลิตคิดเป็นน้ำหนักแห้งที่เก็บเกี่ยวได้ต่อเนื้อที่ต่อปี อ้อยมาเป็นอันดับแรก ทั้งนี้เพราะอ้อยสามารถใช้ปัจจัยสำหรับการเจริญเติบโต เช่น แสงแดด น้ำ อากาศ และธาตุอาหารได้มีประสิทธิภาพมากกว่านั่นเอง นอกจากนี้ อ้อยยังเป็นพืชที่ปลูกง่าย และเมื่อปลูกครั้งหนึ่งแล้วสามารถเก็บเกี่ยวได้หลายครั้ง ดังนั้นอ้อยจึงเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ อ้อยชอบอากาศร้อนและชุ่มชื้น สำหรับประเทศไทยมีการปลูกอ้อยในทุกภาคยกเว้นภาคใต้ ทั้งนี้เพราะสภาพอากาศไม่เหมาะแก่การปลูกอ้อย กล่าวคือมีฝนตกชุก และมีอากาศร้อนตลอดปี ซึ่งสภาพดังกล่าวทำให้อ้อยไม่หวาน นอกจากนี้อาจจะเป็นเพราะว่าภาคใต้มีพืชอื่นที่ให้ผลดีกว่า เช่น ยางพารา และกาแฟ เป็นต้น (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2540)

2.5.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของอ้อย

อ้อยมีชื่อสามัญ (Common Name) เรียกว่า Sugarcane โดยมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Saccharum officinarum* L. จัดอยู่ในวงศ์ (Family) Gramineae ซึ่งลักษณะของอ้อยแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะของอ้อย

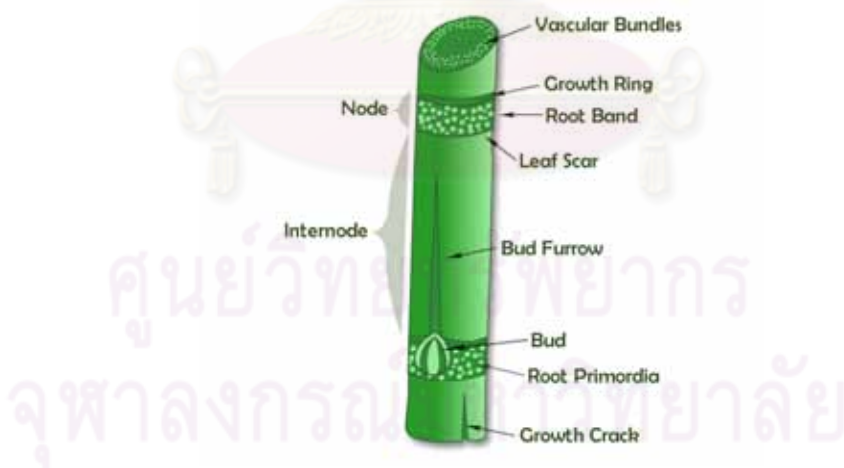
ที่มา: http://sugarcane_egypt.webs.com/botanicalcharacteristics.htm

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. อ้างถึงในสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2540) โดยสามารถจำแนกลักษณะภายนอกของอ้อยได้ ดังนี้

1) ลำต้น (Stalk)

ลำต้นของอ้อย (ดังรูปที่ 2.4) เป็นส่วนสำคัญที่สุดในการขยายพันธุ์ และสะสมน้ำตาล แบ่งเป็นปล้องๆ (Inter Node) แต่ละปล้องจะมีข้อ (Node) และตา (Bud) หนึ่งตาหรือมากกว่านั้น โดยที่ข้อ คือ ส่วนที่อยู่ระหว่างรอยกาบถึงวงเจริญ ส่วนปล้อง คือ ความยาวจากรอยกาบหนึ่งถึงรอยกาบอีกอันหนึ่ง ทั้งข้อและปล้องรวมเรียกว่า จอยต์ (Joint) ซึ่งอาจเรียกง่าย ๆ ว่า "ปล้อง" สำหรับลำต้นจะประกอบด้วยปล้องหลายปล้องที่มีความยาวต่างกัน ตอนโคนสั้นมากและค่อยๆ ยาวขึ้นจนถึงยาวที่สุดแล้วลดลงเมื่อใกล้ยอด (เกษม และอุดม, 2520) อ้อยที่ตัดเมื่ออายุ 12 เดือนมีลำต้นสูงประมาณ 2-3 เมตร มีปล้อง 20-30 ปล้อง ในระยะห่างปล้องอ้อยจะมีปล้องเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยประมาณเดือนละ 3 ปล้อง แต่ละปล้องเมื่อโตเต็มที่ จะยาวประมาณ 10-15 เซนติเมตร ความยาวของปล้องขึ้นอยู่กับพันธุ์และสภาพแวดล้อมโดยเฉพาะน้ำ ปล้องที่เกิดในช่วงที่มีน้ำพอเหมาะจะยาวกว่าปล้องที่เกิดในช่วงที่มีน้ำมากหรือน้อยเกินไป (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2540) เปลือกนอกจะแข็ง ลำต้นประกอบด้วยส่วนต่างๆ (เกษม และอุดม, 2520) ดังนี้



รูปที่ 2.4 ลักษณะของลำต้น

ที่มา: http://www.sugarcane crops.com/growth_morphology/stalk/

1.1) ตา (Bud หรือ Eye) เกิดที่ข้อในบริเวณเกิดราก ตามปกติแต่ละข้อมีหนึ่งตา เกิดสลับกัน ในบางกรณีข้ออาจไม่มีตาหรือมีมากกว่าหนึ่งตา โดยที่สี ขนาด และลักษณะของตา แตกต่างกันไปตามพันธุ์

1.2) บริเวณเกิดราก (Root Band หรือ Root Ring หรือ Root Zone) คือ บริเวณที่อยู่ระหว่างรอยกาบและวงเจริญ ซึ่งความกว้างของบริเวณนี้ไม่ค่อยสม่ำเสมอ และมีลักษณะ แตกต่างกันไปตามพันธุ์

1.3) ปุ่มราก (Root Primordia หรือ Root Initials) เป็นจุดเล็กๆ ในบริเวณเกิดราก ซึ่งรากจะเจริญออกมาจากปุ่มเหล่านี้

1.4) วงเจริญหรือวงแหวน (Growth Ring) คือ ส่วนที่มีลักษณะคล้ายวงแหวน เรียบอยู่เหนือบริเวณเกิดราก ไม่มีไขเกาะ ที่เรียกวงเจริญ ก็เพราะว่าส่วนนี้จะเจริญเติบโตอย่างเห็น ได้ชัด เมื่ออ้อยล้มส่วนของวงเจริญด้านล่างจะยึดตัวมากกว่าด้านบน ทำให้ลำต้นตั้งขึ้น

1.5) รอยกาบ (Leaf Scar หรือ Sheath Scar) เป็นรอยที่เกิดขึ้นหลังจากกาบใบ หลุดแล้ว การหลุดของกาบใบเป็นลักษณะประจำพันธุ์ บางพันธุ์กาบใบแห้งจะหลุดเอง บางพันธุ์ ติดแน่นอยู่กับลำต้น ลักษณะต่างๆ ของรอยกาบ เช่น ความลาดเท และความยื่นของรอยกาบเป็น ลักษณะประจำพันธุ์

1.6) วงไข (Wax Ring) คือ ส่วนที่อยู่ใต้รอยกาบ ส่วนนี้มักจะมีไขเกาะอยู่มากกว่า ส่วนอื่นๆ ของลำต้น ส่วนที่เป็นวงไขอาจคอดหรือเสมอกับลำต้นซึ่งขึ้นอยู่กับพันธุ์ ตามปกติไขเป็นสี ขาว แต่เมื่อเกิดเชื้อราจะเปลี่ยนเป็นสีเทาหรือดำ

1.7) รอยแตกตื้น หรือ รอยแตกลายงา (Corky Cracks) คือรอยแตกเล็กๆ ที่ผิว ของลำต้น มักเกิดขึ้นที่ใต้บริเวณวงไขและส่วนที่อยู่ถัดลงมา ซึ่งลักษณะและปริมาณการแตกจะ ขึ้นอยู่กับพันธุ์และสภาพแวดล้อม

1.8) รอยแตกลึก (Growth Crack หรือ Ring Crack) เป็นรอยแตกขนาดใหญ่ เกิดตามความยาวของลำต้นลึกเข้าไปในเนื้ออ้อย รอยแตกส่วนมากมักจะยาวตลอดปล้อง การเกิด รอยแตกลึกขึ้นอยู่กับพันธุ์และสภาพแวดล้อม

1.9) รอยตกระเกิด (Corky Patch) เป็นรอยแตกตื้นๆ ที่ผิวคล้ายตกระเกิด จำนวนและลักษณะที่เกิดขึ้นอยู่กับพันธุ์และสภาพแวดล้อมเช่นเดียวกัน

1.10) ร่องตา (Bud Furrow หรือ Bud Groove) เป็นร่องที่เกิดขึ้นที่ปล้องซึ่งอยู่ตรงและเหนือตาขึ้นไป บางพันธุ์อาจไม่มี สำหรับพันธุ์ที่มีร่องนี้อาจยาวหรือสั้น ตื้นหรือลึก ซึ่งเป็นลักษณะประจำพันธุ์

2) ตา (Bud)

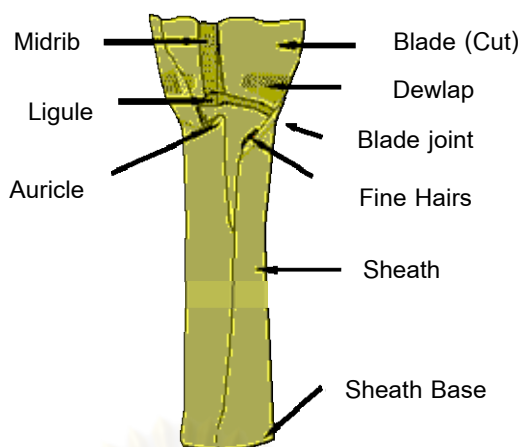
ตาเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากในการจำแนกพันธุ์ รูปร่างของตามีตั้งแต่ค่อนข้างกลมจนถึงคล้ายสามเหลี่ยม ตำแหน่งของตา คือ ระยะระหว่างรอยกาบกับฐานตา ส่วนจุดงอก คือ จุดที่ต้นอ่อนจะโผล่ออกมาเมื่อตาเริ่มผลิ จุดดังกล่าวอาจอยู่กึ่งกลางตา ต่ำกว่า หรือสูงกว่าแล้วแต่ลักษณะพันธุ์ของอ้อย

3) ใบ (Leaf)

ใบอ้อยมีลักษณะคล้ายใบข้าว แต่มีขนาดใหญ่และยาวมากกว่า ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ กาบใบ (Sheath) และแผ่นใบ (Blade) โดยมีลักษณะดังรายละเอียดต่อไปนี้ (รูปที่ 2.5)

3.1) กาบใบ คือ ส่วนที่ติดและโอบรอบลำต้นทางด้านที่มีตา การโอบรอบลำต้นของกาบใบจะสลับข้างกัน เช่น ใบหนึ่งขวาทับซ้าย ใบถัดขึ้นไปซ้ายจะทับขวา ฐานกาบใบกว้างที่สุดแล้วเรียวลงสู่ปลาย

3.2) แผ่นใบ คือ ส่วนที่อยู่ต่อกาบใบขึ้นไป ทั้งสองส่วนแยกจากกันตรงรอยต่อ (Blade Joint) ด้านในของรอยต่อนี้จะมีส่วนยื่นเป็นเยื่อบางๆ รูปร่างคล้ายกระจับเรียกว่าลิ้นใบ (Ligule) ที่ส่วนปลายของกาบใบจะมีความกว้างมากกว่าฐานของแผ่นใบจึงทำให้มีส่วนเกินซึ่งมักจะยื่นขึ้นไปข้างบน เรียกว่า หูใบ (Auricle) ซึ่งอาจจะมีทั้งสองข้าง ข้างเดียวหรือไม่มีเลยก็ได้ ในกรณีที่มีข้างเดียวมักจะอยู่ด้านในเสมอ ลักษณะและรูปร่างของลิ้นใบและหูใบแตกต่างกันตามพันธุ์



รูปที่ 2.5 ลักษณะของใบ

ที่มา: http://sugarcane_egypt.webs.com/botanicalcharacteristics.htm

4) ช่อดอก (Inflorescence)

ดอกย่อยเกิดเป็นช่อที่ยอดของลำต้น ช่อดอกมีลักษณะคล้ายหัวลูกศรจึงมีชื่อเรียกโดยเฉพาะว่า "แฉ่วโรว" (Arrow) การออกดอกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น พันธุ์ อายุ และสภาพแวดล้อม โดยสภาพแวดล้อมที่สำคัญ ได้แก่ ช่วงแสง (Photoperiod) หรือความยาวของวัน อุณหภูมิและความชื้น ปัจจัยเหล่านี้จะต้องมีอย่างเหมาะสมเป็นเวลานานพอจึงจะทำให้ช่อดอกออกดอก สำหรับลักษณะของช่อดอกแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะของช่อดอก

ที่มา: <http://science.howstuffworks.com/environmental/life/botany/sugarcane-info.htm>

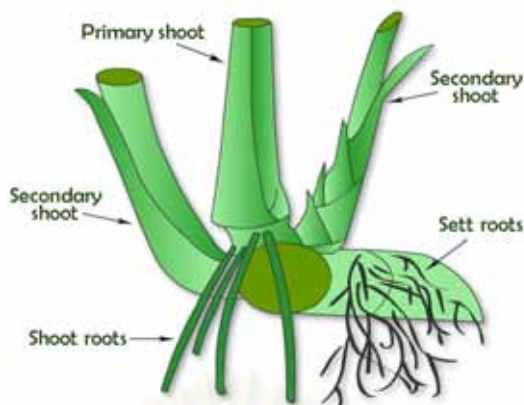
5) ราก

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) เมื่อเอาท่อนพันธุ์ลงปลูกจะปรากฏราก 2 ชุด (ดังรูปที่ 2.7) คือ

5.1) รากของท่อนพันธุ์ (Sett Root หรือ Cutting Root) หรือเรียกว่า รากรุ่นแรก (Primary Root) เป็นรากที่เกิดจากปุ่มรากในบริเวณเกิดรากของท่อนพันธุ์ รากพวกนี้มีลักษณะผอม แตกแขนงมาก ขณะที่ตาของท่อนพันธุ์กำลังเจริญเป็นหน่อ (Shoot) จะได้นำและธาตุอาหารจากดินทางรากเหล่านี้ รากของท่อนพันธุ์จะทำหน้าที่ต่อไปจนกระทั่งหน่อมีรากของตนเองและทำหน้าที่ดูดน้ำและธาตุอาหารแทน หลังจากนั้นรากของท่อนพันธุ์ รวมทั้งตัวท่อนพันธุ์เดิมก็จะหมดสภาพไป

5.2) รากของหน่อ (Shoot Root) หรือเรียกว่า รากถาวร เป็นรากรุ่นที่ 2 (Secondary Root) ที่เกิดจากปุ่มรากของหน่อที่เกิดจากท่อนพันธุ์นั้น รากนี้มีขนาดใหญ่กว่า รากชนิดแรกเมื่อเกิดใหม่ มีลักษณะอวบไม่มีแขนง สีขาว และสีจะเปลี่ยนเป็นน้ำตาลเข้มเมื่ออายุมากขึ้น แม้ว่าปุ่มรากที่ปรากฏในบริเวณเกิดรากของแต่ละข้อจะมีจำนวนจำกัด แต่เนื่องจากส่วนโคนของลำต้นที่อยู่ใต้ดินมีปล้องถี่มาก ทำให้มีรากมาก รากจะเจริญออกมาจากปุ่มรากเท่านั้น การเจริญของรากจะเกิดอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่รากเก่ากำลังเสื่อมสภาพลงนั้น รากใหม่ก็จะเกิดมาทำหน้าที่แทน และแม้ว่ารากที่เกิดในแต่ละข้อมีจำนวนจำกัด แต่การแตกสาขาไม่มีขอบเขตจำกัด โดยเฉพาะในดินที่เหมาะสม รากเหล่านี้สามารถหยั่งในแนวตั้งและแนวนอนได้มากกว่า 100 เซนติเมตร นอกจากรากที่อยู่ใต้ดินแล้วยังมีรากที่เกิดจากข้อเหนือพื้นดินทั้งข้อที่อยู่ใกล้ผิวดิน และสูงขึ้นไป ซึ่งอ้อยบางพันธุ์อาจมีรากยาวที่ข้อซึ่งอยู่ห่างจากพื้นดินมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 ลักษณะของราก

ที่มา: http://www.sugarcane crops.com/growth_morphology/the_root_system/

2.5.2 การเจริญเติบโตของอ้อย (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2540)

เริ่มตั้งแต่ปลูกด้วยท่อนพันธุ์จนถึงการเก็บเกี่ยวอ้อย มีการเจริญเติบโต ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 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 ในระยะงอกนั้นอ้อยแต่ละตาจะงอกขึ้นมาเพียงต้นเดียวเท่านั้น และเมื่อเติบโตจึงจะมีการแตกกอ การแตกกอเป็นลักษณะสำคัญของพืชตระกูลหญ้ารวมทั้งอ้อย เนื่องจากตาที่อยู่ส่วนโคนของลำต้นได้ดินของหน่อแรกเจริญออกมาเป็นหน่อชุดที่สอง และจากหน่อชุดที่สองก็เจริญเป็นหน่อชุดที่สามต่อไป ทำให้มีจำนวนหน่อหรือลำต้นเพิ่มขึ้น การแตกกอจะเริ่มเมื่ออายุประมาณ 1.5 เดือนเป็นต้นไป แต่ระยะที่มีการแตกกอมากที่สุดอยู่ระหว่าง 2.5-4 เดือน หน่อที่อ่อนแอกว่าตายไป เพราะการแข่งขันกันเพื่อปัจจัยในการ

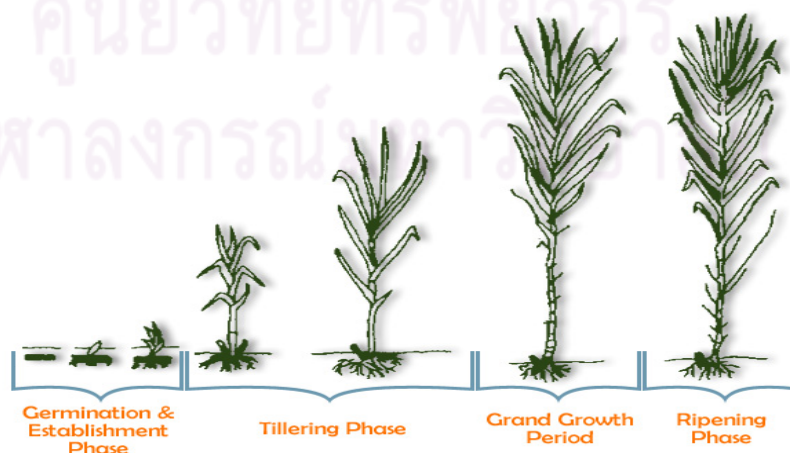
เจริญเติบโต เช่น แสงแดด น้ำ หรือธาตุอาหาร เป็นต้น จำนวนลำต้นต่อกอขณะเก็บเกี่ยวขึ้นอยู่กับจำนวนหน่อในระยะแตกกอนี้

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

เป็นระยะที่ต่อเนื่องกับการแตกกอ ระยะนี้จะมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของปล้องอย่างรวดเร็ว ทำให้อ้อยทั้งลำต้นเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่อายุประมาณ 3-4 เดือน จนถึงอายุประมาณ 7-8 เดือน หลังจากนั้นการเจริญเติบโตจะน้อยลง และเริ่มมีการสะสมน้ำตาลเพิ่มขึ้น ขนาดและความยาวของแต่ละต้นใน ระยะนี้ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับน้ำหนักของแต่ละลำต้น และน้ำหนักแต่ละลำต้นมีผลโดยตรงต่อผลผลิตน้ำหนักของอ้อยเมื่อเก็บเกี่ยว

4) ระยะเวลาแก่และสุก (Maturation and Ripening Phase)

ระยะแก่ คือ ระยะที่มีอัตราการเจริญเติบโตช้าลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับระยะต่างๆ ตามที่ได้กล่าวแล้ว เมื่อการเจริญเติบโตเริ่มช้าลง น้ำตาลที่ใบสร้างขึ้นจากการสังเคราะห์แสงก็จะถูกใช้น้อยลง และเหลือเก็บสะสมในลำต้นมากขึ้น ซึ่งเป็นการเริ่มต้นของระยะสุก การสะสมน้ำตาลจะเริ่มจากส่วนโคนไปหาปลาย ดังนั้นส่วนโคนจึงหวานก่อน และมีความหวานมากกว่าส่วนปลาย สำหรับน้ำตาลที่ใบสร้างขึ้นส่วนใหญ่จะถูกใช้ไปเพื่อการเจริญเติบโตจึงเหลือเก็บสะสมไว้ในลำต้นเพียงส่วนน้อย และเมื่อการเจริญเติบโตช้าลง อ้อยจะมีการสะสมน้ำตาลในส่วนของลำต้นได้มากขึ้น



รูปที่ 2.8 ระยะเวลาการเจริญเติบโตของอ้อย

ที่มา: http://www.sugarcane crops.com/crop_growth_phases/

2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของอ้อย

1) แสงแดด

อ้อยเป็นพืชที่ต้องการแสงแดดมากกว่าพืชอื่นๆ เป็นแสงที่จ้า และต้องได้รับเป็นเวลานาน โดยเฉพาะในระยะที่อ้อยกำลังแตกกอ และย่างปล้อง เมื่ออ้อยได้รับแสงจะสร้างสารสีม่วง หรือเรียกว่าแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) ขึ้นที่เปลือกโดยจะเห็นได้ชัดเมื่ออ้อยทิ้งกาบใบออก ส่วนที่ถูกลแสงจะสร้างสารแอนโทไซยานินขึ้นทำให้มีสีม่วง แสงสว่างจึงมีอิทธิพลทำให้อ้อยเจริญเติบโตตามยาวของลำต้นในแนวตั้ง มีการเจริญเติบโตของรากอย่างเหมาะสม บังคับมิให้อ้อยแทงหน่อมากเกินไป และเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลในใบมากขึ้น ทำให้ใบเขียว

2) ดิน

อ้อยสามารถปลูกได้ในดินเกือบทุกประเภท ตั้งแต่ดินร่วนถึงดินร่วนปนทราย พื้นที่ปลูกควรเป็นที่ราบ ควรหลีกเลี่ยงการปลูกอ้อยในดินเหนียวจัด ดินทรายจัดและดินลูกรัง ถ้าปลูกในเขตน้ำฝนควรมีปริมาณน้ำฝนไม่น้อยกว่า 1,200 มิลลิเมตรต่อปี (สถาบันวิจัยพืชไร่, 2543)

2.1) คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน

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

2.2) คุณสมบัติทางเคมีของดิน

สมบัติทางเคมีของดินมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของอ้อย โดยทั่วไปการปลูกพืชเพื่อให้ผลดีจำเป็นต้องใส่ปุ๋ยหรือเพิ่มธาตุอาหารพืชให้แก่ดิน ปริมาณธาตุอาหารพืชที่ให้ประโยชน์ได้ในดินมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ เนื่องจากดินมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเช่นกัน

2.3) จำนวนจุลินทรีย์ในดิน

เชื้อราและไส้เดือนฝอย เป็นสาเหตุที่ทำให้ผลผลิตของอ้อยลดลง จำนวนและชนิดของจุลินทรีย์ดินมักเปลี่ยนแปลงตามคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี ตลอดจนคุณสมบัติทางชีววิทยาของดินที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ

2.4) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดิน

ดินที่เหมาะสมสำหรับการปลูกอ้อยควรมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินอยู่ระหว่าง 6.0-7.5 เพราะธาตุอาหารในดินจะละลายออกมาให้อ้อยนำไปใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด ดินที่เป็นกรดจัดหรือด่างจัดเกินไปจะทำให้ธาตุอาหารบางชนิดไม่ละลายออกมาให้อ้อยดูดไปใช้ได้ และธาตุอาหารบางชนิดอาจละลายออกมามากเกินไปจนเป็นพิษแก่อ้อย (ปริชา พรหมณี, 2541)

3) อุณหภูมิ

อ้อยเป็นพืชที่ชอบขึ้นในเขตอบอุ่นหรือเขตร้อนชื้น มีแสงแดดพอเพียง อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การงอกของท่อนพันธุ์อ้อย ได้แก่ 30-38 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของอ้อย โดยเฉลี่ยประมาณ 22-30 องศาเซลเซียส อุณหภูมิต่ำสุดที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของอ้อยไม่ควรต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงใกล้เก็บเกี่ยวอ้อย ไม่ควรต่ำกว่า 10-20 องศาเซลเซียส มิฉะนั้นจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของอ้อยและปริมาณน้ำตาลในอ้อย

4) ปริมาณและการกระจายของน้ำฝน

การเจริญเติบโตของอ้อยเป็นการขยายตัวของเซลล์ที่ดูดน้ำเข้าไป ดังนั้นการเจริญเติบโตของอ้อยจึงมีความสัมพันธ์อย่างสูงต่อความชื้นในอากาศและปริมาณน้ำที่ได้รับ ผลผลิตของอ้อย

จึงมีความแปรปรวนไปตามจำนวนน้ำฝนเฉลี่ย ถ้าฝนตกมากเกินไปจะทำให้อัตราการเจริญเติบโตของอ้อยลดลงโดยเฉพาะในบริเวณที่มีการระบายน้ำไม่ดี หากแต่ถ้ามีปริมาณฝนตกน้อย และมีน้ำค้างมากจะมีผลทำให้อ้อยเจริญเติบโตได้ดี เพราะอ้อยสามารถดูดความชื้นโดยทางใบและกาบใบได้ซึ่งจะช่วยลดการคายน้ำของอ้อยลงได้

5) ความชื้นในดิน

อ้อยเป็นพืชที่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ในสภาพของดินที่มีระดับความชื้นแตกต่างกันอย่างมาก บางพันธุ์สามารถทนทานต่อความชื้นในดินได้สูงมาก เช่น พันธุ์ Q 83 และ Pinder

6) ลม

อ้อยที่ถูกลมพัดจัดจะทำให้อ้อยแคะแกระเกิน เนื่องจากอ้อยจะมีการคายน้ำมาก อัตราการเจริญเติบโตของ Shoot : Root จะน้อยกว่าอ้อยที่ไม่ถูกลมพัดจัดมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอ้อยที่ไม่ถูกลมพัดจัดจะมีโอกาสสร้างลำต้นและใบได้ดีกว่าอ้อยที่ปลูกอยู่ทางด้านที่ถูกลมมาก

7) การแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์และพื้นที่ใบ

อ้อยดูดคาร์บอนไดออกไซด์ในรูป CO_2 เข้าไปสู่เซลล์พาลิเสดพาเรนาโคมา (Palisade Parenchyma) และเมโซฟิลล์เซลล์ (Mesophyll Cell) ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการสังเคราะห์แสงโดยเข้าทางปากใบ (Guard Cell) การที่อ้อยมีความสามารถในการสังเคราะห์แสงได้มากย่อมขึ้นอยู่กับเนื้อที่ใบด้วย อย่างไรก็ตามได้มีการทดลองตัดใบอ้อยในขณะที่กำลังเจริญเติบโต ปรากฏว่าปล้องอ้อยมีขนาดเล็กลงเนื่องจากการสังเคราะห์แสงไม่สมบูรณ์ แต่เมื่อปล่อยให้ใบอ้อยถัดขึ้นมา มีขนาดโตขึ้นจนโตเต็มที่ ปล้องอ้อยที่ถัดขึ้นมากก็มีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นกัน แสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์แสงได้ผลเต็มที่ ดังนั้น คาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการสังเคราะห์แสง หากแต่การขาดแคลนคาร์บอนไดออกไซด์ยังไม่เคยมีปัญหาเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม การขาดคาร์บอนไดออกไซด์อาจเกิดจากมลภาวะในอากาศที่กำกวมขึ้นๆ ซึ่งไม่เหมาะสมในการเจริญเติบโตปะปนมาในอากาศทำให้อ้อยสังเคราะห์แสงไม่ได้เต็มที่

8) พันธุ์อ้อย

อ้อยแต่ละพันธุ์มีอัตราการตอบสนองต่อสภาพสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน อ้อยบางพันธุ์จะปลูกให้เก็บเกี่ยวได้ภายใน 12 เดือน แต่บางพันธุ์จะต้องใช้เวลานานถึง 18-24 เดือน ถ้าปลูกอ้อยทิ้งไว้นานกว่านั้น ถ้าที่เจริญเต็มที่แล้วจะแห้งตายและจะเกิดแขนง (Sucker) ขึ้นมากมาย ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ

2.5.4 โรคอ้อย

โรคอ้อยที่พบในประเทศไทยมีมากกว่า 20 โรค แต่ที่ระบาดทำความเสียหายมากมีประมาณ 5 โรค คือ โรคเส้ดำ โรคราสนิม โรคไส้แดง โรคใบลายหรือใบด่าง และโรคใบขาว ดังรายละเอียดของแต่ละโรค ดังนี้

1) โรคเส้ดำ (Smut) เกิดจากเชื้อราชนิดหนึ่ง ซึ่งทำให้อออดมีลักษณะคล้ายไส้ฝอยออกมาที่เส้จะเต็มไปด้วยเขม่าสีดำ ซึ่งหุ้มอยู่ด้วยเยื่อบางสีขาว เมื่อเยื่อแตกออกจะทำให้เขม่าสีดำซึ่งก็คือสปอร์ของเชื้อโรคปลิวไปตามลม โดยลักษณะอื่นๆ ที่ปรากฏก็คือ ลำต้นส่วนใหญ่แคะแกรน ไม่อย่างปล้อง และมีการแตกกอมากผิดปกติ โดยอ้อยตอเป็นมากกว่าอ้อยปลูก

2) โรคราสนิม (Rust) เกิดจากเชื้อราชนิดหนึ่งเกิดที่ใบ ทำให้ใบเป็นจุดเล็กๆ สีคล้ายสนิมเหล็กเป็นจำนวนมาก มองดูคล้ายใบเป็นสนิมทั้งใบ ใบแก่ที่อยู่ข้างล่างเป็นมากกว่าใบอ่อน

3) โรคไส้แดง (Red Rot) เกิดจากเชื้อราทำให้ภายในลำต้นเป็นสีแดง และมีสีขาวสลับเป็นห้วง ๆ มักเป็นแก่ก่อนพันธุ์และอ้อยที่แก่พร้อมที่จะเก็บเกี่ยว

4) โรคใบลายหรือใบด่าง (Mosaic) เกิดจากเชื้อไวรัส ทำให้ใบอ่อนหรือใบที่เพิ่งคลี่มีลักษณะเป็นลายสีเขียวอ่อน หรือสีเขียวอมเหลืองสลับกับสีเขียวเข้มของใบปกติ อาการดังกล่าวปรากฏทั้งใบ โรคนี้เป็นแก่อ้อยที่ปลูกเป็นการค้าในประเทศแทบทุกพันธุ์

5) โรคใบขาว (White Leaf) เกิดจากเชื้อไมโคพลาสมา (Mycoplasma) ของอ้อย ทำให้ใบอ่อนเป็นสีขาวทั้งใบ และลำต้นแคะแกรน แตกกอคล้ายตะไคร้แต่ไม่มีลำ พบได้ทุกระยะของการเติบโต และพบในอ้อยตอมากกว่าอ้อยปลูก

2.5.5 แมลงศัตรูอ้อย

แมลงศัตรูอ้อยในประเทศไทยมีมากกว่า 70 ชนิด (กรมวิชาการเกษตร, 2523) แต่ที่เคยระบาดทำความเสียหายอย่างรุนแรงมีเพียงไม่กี่ชนิด เช่น เพลี้ยหอย หนอนกอลาย หนอนกอสีชมพู หนอนกอสีขาว แมลงหีขาวอ้อย ปลวก แมลงงูหนอนหวง และด้วงหนวดยาว เป็นต้น ดังรายละเอียดของแมลงศัตรูอ้อย ต่อไปนี้

1) เพลี้ยหอย ตัวเมีย ตัวอ่อน และตัวเต็มวัย จะดูดกินอยู่ตามลำต้นอ้อย ทำให้อ้อยมีน้ำตาลที่สะสมลดลงประมาณ 31% และทำให้น้ำหนักอ้อยลดลงประมาณ 21%

2) หนอนกอลาย มี 3 ประเภทคือ หนอนกอลายจุดเล็ก หนอนกอลายจุดใหญ่ และหนอนกอลายใหญ่ โดยหนอนกอลายจะเข้าทำลายในระยะหน่อทำให้อ้อยเกิดอาการยอดแห้งตาย เมื่ออ้อยอยู่ในระยะอย่างปล้อง หนอนดังกล่าวจะเจาะลำต้นและยอดอ้อย

3) หนอนกอสีชมพู จะเข้าทำลายในระยะหน่ออ้อยทำให้อ้อยยอดแห้งตายเหมือนหนอนกอลายในระยะอ้อยอย่างปล้อง หนอนจะเจาะเข้าทำลายลำต้นอ้อยน้อยกว่าหนอนกอลาย

4) หนอนกอสีขาว จะเจาะเข้าเส้นกลางใบอ้อยที่เพิ่งคลี่ใบ โดยจะทำลายใบอ้อยที่กำลังเจริญเติบโตมีผลทำให้ใบยอดมีพฤษภาคม สั้นและแห้งตาย ในระยะอ้อยอย่างปล้องหนอนจะเข้าทำลายส่วนที่เจริญเติบโตทำให้อ้อยแตกหน่อข้าง เรียกว่า ยอดพุ่ม

5) แมลงหีขาวอ้อย ทั้งตัวอ่อนและตัวเต็มวัยจะดูดกินน้ำเลี้ยงอยู่ใต้ใบอ้อย แต่ตัวอ่อนทำลายมากกว่า ทำให้ใบอ้อยกลายเป็นสีเหลือง มีผลทำให้น้ำตาลลดลงและอ้อยชะงักการเจริญเติบโต

6) ปลวก เริ่มเข้าทำลายตั้งแต่ท่อนพันธุ์ตอนปลูกทำให้อ้อยไม่งอก และแห้งตายเมื่ออ้อยโตโดยปลวกจะเข้าไปกินเนื้ออ้อยหรือทำเป็นโพรงที่สูงขึ้น แล้วปลวกจะนำดินมาบรรจุแทนส่วนของเนื้ออ้อยที่ถูกกินไป ทำให้อ้อยหักล้มและแห้งตาย

7) แมลงงูหนอนหวง ตัวหนอนจะกินรากอ้อยเป็นอาหาร จะทำให้ใบอ้อยและกออ้อยแห้งตายไปทั้งกอ กออ้อยจะตั้ง ออกจากดินได้ง่ายเพราะรากถูกทำลายหมด

8) ดัชนีความยาว หนอนอาจเจาะเข้าทำลายตั้งแต่้อยยังเป็นท่อนพันธุ์ในระยะอ้อยแตกกอ โดยจะกัดกินตรงส่วนโคนที่ติดกับเหง้าให้ขาดทำให้หน่อแห้งตาย ขณะหนอนยังเล็กจะเจาะไว้มากจากโคนขึ้นไปกินเนื้ออ้อยจนบางครั้ง เป็นโพรงเหลือแต่เปลือกซึ่งทำให้ต้นอ้อยหักล้ม

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิชรัตน์ ธรรมบำรุง (2545) ทำการศึกษาและเปรียบเทียบการสะสมของสารหนูในเปลือกและบอนที่ความเข้มข้นของสารหนูในดินที่แตกต่างกัน คือ 0, 100, 200 และ 400 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกิโลกรัมของดิน และศึกษาประสิทธิภาพของสาร EDTA ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการสะสมสารหนูในพืชทั้งสองชนิด โดยเติมสาร EDTA ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมของดิน และทำการเก็บตัวอย่างทุก 20 วันจนครบ 100 วัน และวิเคราะห์สารหนูที่สะสมในพืชโดยแบ่งเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ราก หัว ก้านใบ และใบ ผลการศึกษาพบว่า พืชทั้งสองชนิดมีการสะสมสารหนูได้มากที่สุดที่ ราก รองลงมา คือ หัว ก้านใบ และใบ ตามลำดับ และพบว่า การเติม EDTA สามารถช่วยให้พืชดูดซับสารหนูได้มากขึ้นในพืชทั้งสองชนิดได้ โดยพบว่า การสะสมสารหนูมีค่ามากที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเปลือกมีการสะสมสารหนูเท่ากับ 40.34 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ขณะที่บอนพบว่า มีค่าการสะสมสารหนูเท่ากับ 46.79 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

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 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ และสำหรับปริมาณโลหะหนักที่สะสมในต้นอ้อย มีปริมาณเท่ากับ 0.0054, 0.39, 0.0062, 0.02 และ 1.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (น้ำหนักสด) ตามลำดับ

Luo, Shen และ Li (2004) ทำการศึกษาคูดึงและเคลื่อนย้ายโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม ออกจากดินที่ปนเปื้อนโดยใช้ข้าวโพด (*Zea mays* L.) และพืชตระกูลถั่ว (*Phaseolus vulgaris* L.) ในการศึกษาที่มีการใช้สารคีเลต 3 ชนิดคือ EDTA, EDDS และกรดซิตริก (Citric acid; CA) ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1, 2.5 และ 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ระยะเวลาที่ใช้เก็บตัวอย่างคือ 7 และ 14 วันหลังจากใส่สารคีเลตแต่ละชนิด ผลการศึกษาพบว่า ระดับความเข้มข้นของ EDDS ที่มากขึ้นจะส่งผลต่อทองแดงในข้าวโพด และถั่วมากกว่า EDTA โดยที่ความเข้มข้นของ EDDS ที่ 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดินช่วยทำให้ทองแดงสะสมในส่วนลำต้น

เนื้อดินของพืชสูงขึ้น เท่ากับ 2,060 และ 5,130 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของข้าวโพดและถั่ว ตามลำดับ โดยเพิ่มขึ้น 45 และ 135 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้ใส่สารคีเลต ในขณะเดียวกัน EDTA สามารถช่วยให้ตะกั่วมีการสะสมในส่วนเนื้อดินของพืชเพิ่มสูงที่สุด 270 และ 487 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ของข้าวโพดและถั่ว ตามลำดับ โดยเพิ่มขึ้นเป็น 9 และ 43 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้ใส่สารคีเลต สำหรับการสะสมสังกะสีในส่วนลำต้นเนื้อดินที่ใช้ EDDS มีค่าการสะสมสูงกว่า EDTA สรุปได้ว่า EDDS มีผลในการช่วยให้ทองแดงและสังกะสีอยู่ในรูปที่เคลื่อนย้ายได้ในพืชมากกว่า EDTA ส่วน EDTA มีผลช่วยทำให้ตะกั่วและแคดเมียมอยู่ในรูปที่เคลื่อนย้ายได้ในพืชมากกว่า EDDS และการใช้ EDDS สามารถเพิ่มการดูดดึงทองแดงได้มากที่สุด ส่วนการใช้ EDTA สามารถเพิ่มการดูดดึงตะกั่วได้มากที่สุด สำหรับ CA มีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักได้น้อยกว่า EDTA และ EDDS

Barzegar et al. (2005) ศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนระดับความเข้มข้นของแคดเมียม นิกเกิล และสังกะสี ในดินที่มีการปล่อยให้ทิ้งร้างจากการปลูกอ้อยเป็นระยะเวลา 36, 20, 2 และ 1 ปี พบว่าปริมาณแคดเมียมสะสมในดินได้สูงสุดเท่ากับ 0.16, 0.13, 0.25 และ 0.38 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ดังนั้น เมื่อมีการปล่อยพื้นที่ทิ้งไว้เป็นระยะเวลานาน สามารถลดปริมาณแคดเมียมในดินลงได้ โดยการศึกษาครั้งนี้ยังพบว่า ปริมาณแคดเมียมในดินที่มีการปล่อยพื้นที่ทิ้งร้างจากการปลูกอ้อย มีระดับต่ำกว่าดินที่ไม่มีการปลูกอ้อยแต่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเป็นเวลา 1 ปี นอกจากนี้ยังพบว่าแคดเมียมมีการสะสมอยู่ในอ้อยทั้งต้นมีค่าเท่ากับ 15.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในชานอ้อยมีค่าเท่ากับ 0.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่ในกากน้ำตาล และน้ำตาลทรายขาวมีปริมาณแคดเมียมน้อยมากจนไม่สามารถหาค่าได้

Evangelou et al. (2006) ทำการศึกษาความสามารถของสารคีเลต 2 ชนิด คือ EDDS และ EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1.5, 3.125, 6.25, 12.5, 25 และ 50 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ต่อการดูดดึงแคดเมียม และทองแดงออกจากดินที่ปนเปื้อนโดยใช้ต้นยาสูบ (*Nicotiana tabacum*) ผลการศึกษาพบว่า ระดับความเข้มข้นของ EDTA และ EDDS ที่เพิ่มขึ้น สามารถทำให้ต้นยาสูบดูดดึงทองแดงได้มากขึ้น แต่ไม่เพิ่มการดูดดึงแคดเมียม และพบว่า สารคีเลตทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายแคดเมียมจากรากสู่ยอดได้ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม นอกจากนี้พบว่าการใช้ EDDS มีผลต่อการแสดงความเป็นพิษต่อยาสูบ ซึ่งหลังจากใส่สาร EDDS ไป 7 วัน แล้วพบว่า ยาสูบแสดงอาการใบเหี่ยว (Necrosis) และใบเหลือง (Chlorosis) และมีมวลชีวภาพต่ำกว่าชุดควบคุมซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแต่ไม่แสดงความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ดิน ส่วน EDTA ไม่มีการแสดงความเป็นพิษต่อยาสูบ จากผลการศึกษาครั้งนี้สรุปได้ว่า

EDDS และ EDTA ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการเพิ่มการดูดซับแคดเมียม และทองแดงของต้นยาสูบ

ศราริน กลิ่นโพธิ์กลับ (2549) ทำการศึกษาผลของสารปรับปรุงดินที่มีต่อการดูดซับแคดเมียมของถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน โดยมีดินปนเปื้อนแคดเมียมทั้งสิ้น 4 ระดับ ได้แก่ 13, 30, 50 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และใช้สารปรับปรุงดิน 6 ชนิด ได้แก่ ซีโอไลท์ เบนทอนไนต์ ปูนมาร์ล ฟางข้าว แกลบเผา และไมไล่สารปรับปรุงดิน ทำการทดลองตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2547 ถึงเดือนสิงหาคม 2548 ผลการทดลองพบว่า ปริมาณการดูดซับแคดเมียม และสังกะสีในเมล็ด ลำต้น และใบของถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่ใส่ฟางข้าว มีปริมาณต่ำกว่าถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่ใส่สารปรับปรุงดินชนิดอื่นๆ และเมื่อระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินสูงขึ้น มีผลทำให้ถั่วเหลืองดูดซับแคดเมียมและสังกะสีได้มากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าถั่วเหลืองมีความสามารถในการสะสมแคดเมียม สังกะสี เหล็ก และแมงกานีสในลำต้นและใบมากกว่าในเมล็ด

วราภรณ์ ศรีตัมภวา และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2550) ทำการศึกษาความสามารถในการใช้อ้อยดูดซับแคดเมียมออกจากดินที่ปลูกในเรือนทดลอง โดยใช้สารประกอบแคดเมียมไนเตรต ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ที่ระดับความเข้มข้น 0, 10, 20, 40 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน และเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 3 และ 6 เดือน ทำการวิเคราะห์หาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย 5 ส่วน คือ ราก ท่อนพันธุ์เดิม ขานอ้อย ใบ และน้ำอ้อย ผลการศึกษาพบว่า ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในดินของอ้อยที่ปลูกในเรือนทดลองที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมดิน มีค่าเท่ากับ 38.96 และ 31.64 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลา 3 และ 6 เดือน ตามลำดับ สำหรับการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย พบว่า มีการสะสมแคดเมียมไว้ในส่วนรากมากที่สุดเท่ากับ 96.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมากกว่าท่อนพันธุ์เดิม ขานอ้อย ใบ และน้ำอ้อย ที่ระยะการเก็บเกี่ยว 6 เดือน

ชิดชนก อัครโกศล (2550) ทำการศึกษาผลของสารคีเลตต่อการสะสมแคดเมียมของทานตะวัน (*Helianthus annuus* Linn.) โดยเติมสารละลายแคดเมียมไนเตรต ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ที่ระดับความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หลังจากปลูกพืชเป็นเวลา 35 วัน โดยมีการเติมสารคีเลต 3 ชนิด ได้แก่ EDTA, EDDS และ Citric acid ซึ่งได้มีการแบ่งการเติมสารคีเลตแต่ละชนิดออกเป็น 1, 2 และ 3 ครั้ง หลังจากนั้นทำการเก็บเกี่ยวพืชและทำการวิเคราะห์หาแคดเมียมในส่วนเหนือดิน ราก และทั้งต้น ผลการศึกษาพบว่า การเติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน จำนวน 1 ครั้ง มีผลทำให้การสะสมแคดเมียมทั้งต้นมากที่สุดคือ 25 มิลลิกรัมต่อ

กิโลกรัมดิน (น้ำหนักแห้ง) และพบว่า EDTA มีการละลายตัวช้ากว่า EDDS และ Citric acid จึงทำให้ EDTA สามารถปลดปล่อยแคดเมียมให้อยู่ในสารละลายได้มากกว่า EDDS และ Citric acid

Smolinska และ Cedzynska (2007) ทำการศึกษาผลของสารคีเลต 2 ชนิด คือ EDTA และ ยูรีเอส (Urease) ในการช่วยดูดซับปรอทด้วยต้นเทียนแดง (*Lepidium sativum*) โดยทำการเติมสารคีเลตที่ระดับความเข้มข้น 3 ระดับ คือ EDTA 1 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ยูรีเอส 0.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และ EDTA ผสมยูรีเอส (1 กรัมต่อกิโลกรัมดิน + 0.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน) เติมลงไปในพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของสารประกอบปรอท 3 ระดับ คือ 2, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ผลการศึกษาพบว่า ในช่วงที่ยังไม่เติมสาร ปรอทมีการสะสมในส่วนของรากพืชมากที่สุด และเมื่อเติม EDTA ลงไปพบว่า EDTA ช่วยดูดซับปรอทไปสะสมในส่วนลำต้นและใบมากขึ้นเมื่อเทียบกับการทดลองที่ไม่ได้เติม EDTA เช่นเดียวกับการเติมยูรีเอส ในขณะที่การเติม EDTA ผสมยูรีเอสพบว่า พืชมีประสิทธิภาพในการสะสมปรอทได้ดีที่สุด โดยมีการสะสมปรอทไว้ที่พืชคิดเป็น 20 เปอร์เซ็นต์จากความเข้มข้นปรอทในดินทั้งหมด โดยส่วนใหญ่สารประกอบปรอทมีการสะสมในส่วนใบและลำต้นพืชมากที่สุด คิดเป็น 46.0 - 56.9 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นปรอททั้งหมดในเนื้อเยื่อ

ทิพวรรณ พจนานภรณ์ และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2552) ทำการศึกษาผลของสารคีเลตต่อการดูดซับตะกั่วโดยการปลูกสับปะรด (*Ananas comosus* (L.) Merr.) ในดินปนเปื้อน ดูแลรักษาในเรือนเพาะชำประมาณ 30 วัน หลังจากนั้นเติมสารละลายตะกั่วไนเตรท ($Pb(NO_3)_2$) ที่ระดับความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และเติมสารคีเลต 2 ชนิด คือ EDTA และ EDDS ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ทำการเก็บเกี่ยวพืชทุกๆ 30, 60, 90 และ 120 วัน และวิเคราะห์หาตะกั่วในดิน และพืช (ส่วนบนดิน และส่วนใต้ดิน) นอกจากนี้ศึกษากการเจริญเติบโตของสับปะรด โดยพิจารณาจากน้ำหนักแห้ง และการสังเกตความเป็นพิษจากการแสดงอาการของสับปะรด ผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะเวลา 30 วัน สาร EDDS มีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วในส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดินของสับปะรดสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 172.75 และ 679.27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ ในขณะที่ระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว 60 วัน พบว่า การเติม EDTA มีผลต่อความสามารถในการดูดซับตะกั่วในส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดินมากที่สุดคือ 288.14 และ 796.66 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า สาร EDTA มีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าสาร EDDS ที่อายุของสับปะรด 60 วัน ทั้งนี้ สารคีเลตทั้งสองชนิดไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสับปะรดอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการปลูกพืช

- 1) เรือนเพาะชำ
- 2) พันธุ์อ้อยที่ใช้คือ พันธุ์ลูกผสม LK 92-11
- 3) ดินทดลองที่นำมาศึกษาในเรือนเพาะชำ เป็นตัวอย่างดินลึกประมาณ 0-30 เซนติเมตร จากพื้นที่ดินที่ปนเปื้อน บริเวณอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก
- 4) ภาชนะปลูกเป็นถุงพลาสติกสีดำอย่างหนาที่มีขนาด 9×16 นิ้ว และห่อหุ้มด้วยพลาสติกอย่างหนา
- 5) สารคีเลต ได้แก่ เอทิลีนไดอะมีนเตตระอะซีติกแอซิด (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA) ที่ระดับความเข้มข้นทั้งสิ้น 3 ระดับ คือ 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยให้ได้ตามสัดส่วนความเข้มข้นในดินเท่ากับ EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 186.12, 372.24 และ 744.48 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ
- 6) เครื่องชั่งหยาบ 1 ตำแหน่ง
- 7) ป้าย

3.1.2 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างดิน พืชและน้ำชะ

- 1) เสียมขนาดเล็กสำหรับขุดพืชและตักดิน
- 2) มีดหรือกรรไกร
- 3) อุปกรณ์สำหรับตูดน้ำชะ (กาลักน้ำ)
- 4) ถุงสำหรับเก็บตัวอย่างดินและพืช
- 5) ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำชะ และ น้ำอ้อย
- 6) ฉลากสำหรับติดตัวอย่างดิน พืช และน้ำชะ
- 7) น้ำปราศจากไอออน (Deionize, DI)

3.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

- 1) เครื่องแก้วชนิดต่างๆ ได้แก่ บีกเกอร์ (Beaker) กระจกตวง (Cylinder) ปิเปต (Pipet) กรวยกรอง (Funnel) แท่งแก้ว (Glass Rod) ขวดปรับปริมาตร (Volumetric) กระจกนาฬิกา (Watch Glass) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask)
- 2) กระดาษกรอง เบอร์ 40 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร (Whatman, England)
- 3) กระจกกรอง GF/C (Glass Micro Filters) เส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร (Whatman, England)
- 4) พาราฟิล์ม
- 5) ชุด Flask Buchner Filtration
- 6) ตะแกรงร่อนดินขนาด 2 มิลลิเมตร
- 7) ขวดพลาสติก สำหรับใส่สารละลายสกัดขนาด 60 มิลลิลิตร
- 8) ถังซีป
- 9) ตู้อบความร้อน (Hot Air Oven) รุ่น ULE 500, MEMMERT
- 10) เตาไฟฟ้า (Hot Plate) รุ่น Cimarec 2, Thermolyne
- 11) เครื่องวัดความเป็นกรดเป็นด่าง (pH Meter)
- 12) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC)
- 13) เครื่องวัดค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชัน (ORP Meter)
- 14) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง พิกัด 220 กรัม รุ่น BP 221S, Sartorius
- 15) บั๊มดูดอากาศ รุ่น N035AN.18-IP20
- 16) เครื่องเขย่าแบบหมุนวน (Mechanical Shaker)
- 17) เครื่องบดตัวอย่างพืช (Blender)
- 18) ตู้ดูดอากาศ (Hood)
- 19) เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) รุ่น ETHOS SEL, MILESTONE
- 20) เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS) รุ่น AAnalyst 800, Perkin Elmer

3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

- 1) กรดไนตริกเข้มข้น (65% HNO_3)
- 2) กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (37% HCl)
- 3) กรดซัลฟูริกเข้มข้น (95-97% H_2SO_4)
- 4) กรดเปอร์คลอริก (70% HClO_4)
- 5) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% H_2O_2)
- 6) กรดไดเอทิลลีนไตรเอมีนเพนตะอะซีติก; DTPA ($\text{C}_{14}\text{H}_{23}\text{N}_3\text{O}_{10}$)
- 7) ไตรเอทานอลามีน (TEA) ($\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})$)
- 8) แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

3.2 สถานที่ดำเนินการวิจัย

3.2.1 สถานที่เก็บตัวอย่างดิน

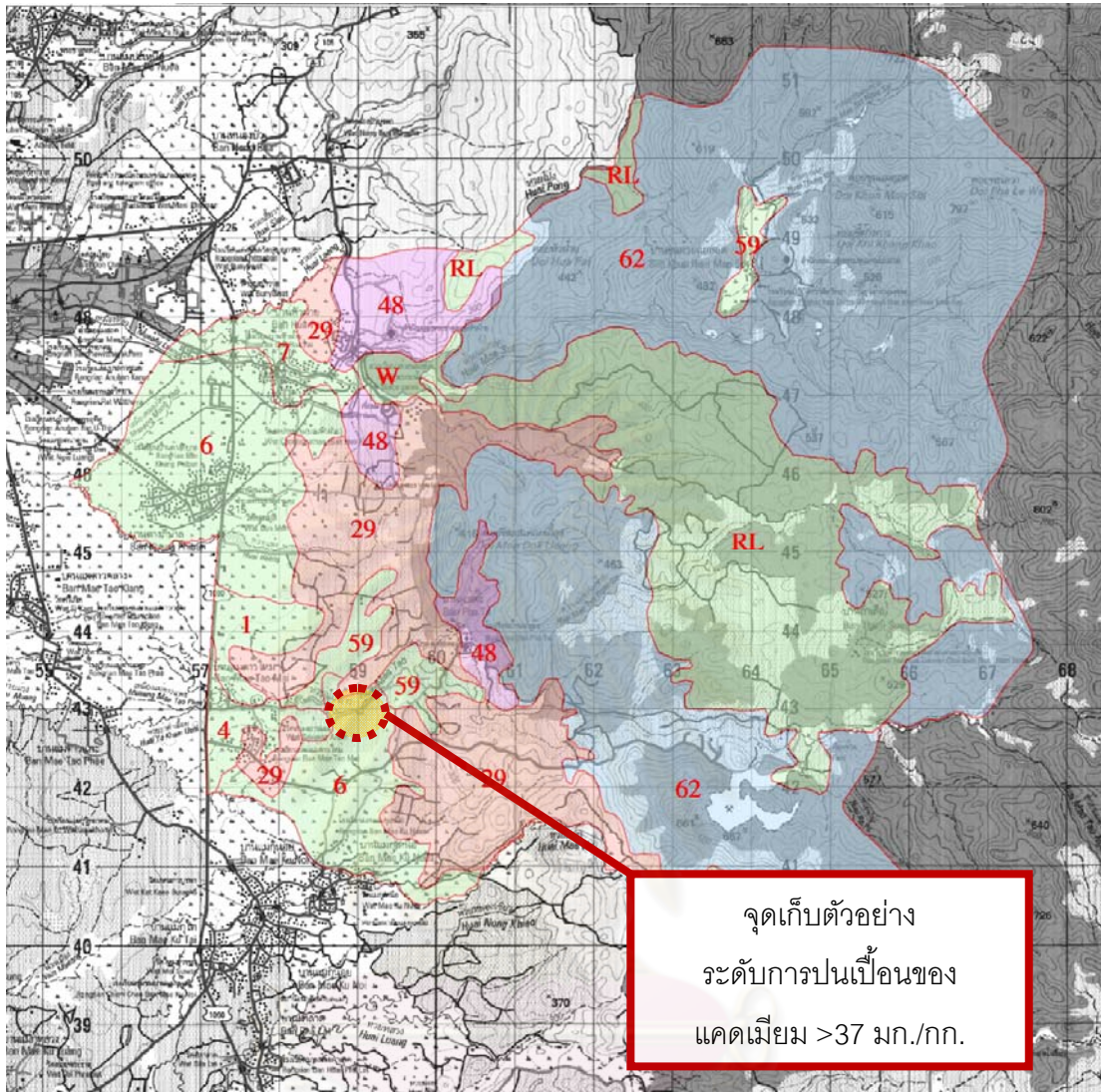
ดินที่ใช้ในการวิจัยเก็บมาจากพื้นที่ดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมมากกว่า 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม บริเวณตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งสามารถแสดงตำแหน่งของจุดเก็บตัวอย่าง ได้ดังรูปที่ 3.1

3.2.2 สถานที่ปลูกพืช

พื้นที่ชั้น 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.3 สถานที่วิเคราะห์ตัวอย่าง

ห้องปฏิบัติการ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการ ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



หมายเหตุ ตัวเลขสีแดง หมายถึงกลุ่มชุดดิน

รูปที่ 3.1 แผนที่ และตำแหน่งของจุดเก็บตัวอย่างดิน ในพื้นที่ของตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

ที่มา: ดัดแปลงจากกรมส่งเสริมการเกษตร, 2552

http://www.doae.go.th/prompt/2552/090305_02/Disc01/MAIN/TK/TK__0604.html

3.3 ระยะเวลาการวิจัย

เริ่มดำเนินการวิจัยในระหว่างเดือนเมษายน 2552 ถึงเดือนมีนาคม 2554 ตั้งแต่การค้นคว้าหาข้อมูล การทบทวนเอกสาร การวางแผนการวิจัย การเก็บตัวอย่าง การวิเคราะห์ผล วิจัย และ

สรุปผลการวิจัย โดยการศึกษาวิจัยในพื้นที่จริง และเรือนทดลอง สามารถแสดงรายละเอียดของวันที่ทำการเก็บตัวอย่าง และขั้นตอนของการศึกษาได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วันที่ทำการทดลอง และดำเนินการเก็บตัวอย่างดิน น้ำชะ และพืชในเรือนทดลอง

ขั้นตอนการศึกษา	วันที่
สำรวจ และเก็บตัวอย่างดินและพืชมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติเบื้องต้น	13 มีนาคม 2552
วันปลูกอ้อย	10 พฤษภาคม 2552
เติมสารอีดีทีเอ (EDTA)	10 มิถุนายน 2552
เก็บตัวอย่างดิน น้ำชะและอ้อยครั้งที่ 1	11 สิงหาคม 2552
เก็บตัวอย่างดิน น้ำชะและอ้อยครั้งที่ 2	12 ตุลาคม 2552
เก็บตัวอย่างดิน น้ำชะและอ้อยครั้งที่ 3	12 ธันวาคม 2552
เก็บตัวอย่างดิน น้ำชะและอ้อยครั้งที่ 4	12 กุมภาพันธ์ 2553

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 การดำเนินการวิจัย

ได้สรุปขั้นตอนการดำเนินการวิจัยในภาพรวมของงานทั้งหมด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 และมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.4.1 การเตรียมดิน ภาชนะปลูก พีช และสารคีเลต

1) การเตรียมดิน

1.1) การสำรวจพื้นที่ พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างดิน จากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยชุดดินตัวอย่างในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม มากกว่า 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยวิธีการแบบสุ่ม ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร โดยนำตัวอย่างดินทำการวิเคราะห์ ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total Cd) และปริมาณสังกะสีทั้งหมด (Total Zn)

1.2) ดินที่ใช้ในการปลูกพีช นำมาจากบริเวณพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยวิธีการแบบสุ่ม ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร เป็นตัวอย่างดินรวมจำนวน 480 กิโลกรัม จากนั้นนำดินมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำดินมาทุบให้มีขนาดเล็กและเท่ากัน จากนั้นคลุกเคล้าดินทั้งหมดให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว ทำการชั่งดิน 10 กิโลกรัม ใส่ถุงพลาสติกสีดำอย่างหนาที่มีขนาด 9×16 นิ้ว แล้วหุ้มด้วยพลาสติกอย่างหนาเพื่อรองรับโลหะหนักที่จะออกมากับน้ำที่ใช้รดต้นไม้

1.3) ทำการสุ่มตัวอย่างดิน โดยแบ่งตัวอย่างดินออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) นำตัวอย่างดินมาผึ่งลม (Air Dry) ให้แห้ง บด และร่อนผ่านตะแกรง 10 Mesh หรือ 2 มิลลิเมตร เพื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวอย่างดิน (Soil Properties) โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ 2) นำตัวอย่างดินมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง บด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อทำการวิเคราะห์โลหะหนัก

2) การเตรียมภาชนะปลูก

นำถุงพลาสติกสีดำอย่างหนาที่มีขนาด 9×16 นิ้ว ชั่งดินน้ำหนัก 10 กิโลกรัม ใส่ในภาชนะทดลอง แล้วหุ้มด้วยพลาสติกอย่างหนาเพื่อรองรับโลหะหนักที่จะออกมากับน้ำที่ใช้รดต้นไม้ โดยแบ่งดินที่ใช้ในการทดลองเป็น 4 ชุดๆ ละ 12 ถุง จำนวนทั้งหมด 48 ถุง

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ และวิธีการวิเคราะห์ดินที่นำมาศึกษา

คุณสมบัติดิน	หน่วย	ค่าที่วิเคราะห์ได้
ลักษณะเนื้อดิน (Soil Texture)	-	Hydrometer Method
ความเป็นกรด-ด่างของดิน (pH)	-	pH Meter (ดิน:น้ำ = 1:1)
ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (CEC)	เซนติโมลต่อกิโลกรัม	NH ₄ ⁺ Saturation and Distillation
ค่าการนำไฟฟ้า (EC)	เดซิซีเมนต่อเมตร	Soil: Water 1:5
ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (OM)	เปอร์เซ็นต์	Walkley-Black method
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen)	เปอร์เซ็นต์	Kjeldahl Method
ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ (Available Phosphorus)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	Bray II extraction
ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ (Available Potassium)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	Ammonia Acetate 1N pH 7.0 Extraction
แคดเมียมทั้งหมด (Total Cd)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	AAS
สังกะสีทั้งหมด (Total Cd)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	AAS

3) การเตรียมพืชทดลอง

ทำการสุ่มตัวอย่างท่อนพันธุ์อ้อย คือ พันธุ์ LK 92-11 จำนวน 3 ท่อน นำมาวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม และสังกะสี โดยการย่อยด้วยกรดไนตริก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตามวิธีการของ United States Environmental Protection Agency (USEPA) Method 3052 (USEPA, 1996) แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด และสังกะสีทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS) ซึ่งพบว่าปริมาณสังกะสีทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 11.49 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเครื่องไม่สามารถวัดค่าปริมาณแคดเมียมทั้งหมดได้ (Not Detectable) แสดงให้เห็นว่า ท่อนพันธุ์ที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ ไม่มีการปนเปื้อนหรือการสะสมแคดเมียมแต่อย่างใด จากนั้นคัดเลือกท่อนพันธุ์อ้อยที่ใช้สำหรับปลูกต้องมีขนาด และน้ำหนักใกล้เคียงกัน ท่อนพันธุ์ที่ใช้ปลูกแต่ละท่อนมีตา 2-3 ตา และตาควรมีลักษณะเต่ง สมบูรณ์ และตาไม่บอด

4) การเตรียมสาร EDTA

การเตรียมสาร EDTA เตรียมจากสารประกอบ $\text{Na}_2\text{EDTA}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ที่ระดับความเข้มข้นทั้งสิ้น 3 ระดับ คือ 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยให้ได้ตามสัดส่วนความเข้มข้นในดินเท่ากับ อีดีทีเอ (EDTA) ที่ระดับความเข้มข้น 186.12, 372.24 และ 744.48 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน (ppm) ตามลำดับ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปริมาณสาร EDTA ที่เติมลงในดินทดลอง

ความเข้มข้นของสาร EDTA (มิลลิโมล)	ปริมาณสารประกอบ EDTA (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน)	ปริมาณสารประกอบ EDTA (กรัมต่อดิน 10 กิโลกรัม)
0.5	186.12	1.86
1	372.24	3.72
2	744.48	7.44

หมายเหตุ: วิธีการคำนวณดังกล่าว ก

3.4.2 วิธีการปลูกพืช และการดูแลรักษา

นำท่อนพันธุ์อ้อยที่คัดเลือกแล้วปลูกลงในภาชนะที่ใส่ดินเตรียมไว้จำนวน 1 ท่อนพันธุ์ต่อภาชนะ รดน้ำ และดูแลรักษาจนกว่าตาอ้อยงอกและเจริญเติบโตเป็นระยะเวลา 1 เดือน หลังจากนั้นทำการเติม EDTA ตามความเข้มข้นที่ได้เตรียมไว้โดยแบ่งตามชุดการทดลอง 4 ชุดๆ ละ 12 ถู จำนวนทั้งหมด 48 ถู ดังนี้ 1) ชุดควบคุม คือ ชุดที่ปลูกพืชแต่ไม่เติม EDTA 2) ชุดที่ปลูกพืชและเติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน 3) ชุดที่ปลูกพืชและเติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และ 4) ชุดที่ปลูกพืชและเติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งทั้ง 4 ชุดการทดลองจะไม่มี การเติมปุ๋ยตลอดการทดลอง โดยมีการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ในบล็อก (Randomized Complete Block Design ; RCBD) และทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

สำหรับการรดน้ำ จะทำการรดน้ำต้นอ้อย ประมาณ 1 ลิตรในตอนเช้าวันเว้นวัน และถ้าวันใดฝนตกจะไม่รดน้ำ นอกจากนี้ น้ำที่เหลืออยู่ก้นถูจะมีการดูมารดใหม่จนกว่าน้ำจะแห้ง

3.4.3 การเก็บตัวอย่าง

1) การเก็บตัวอย่างดิน โดยทำการเก็บตัวอย่างดินในช่วงที่ต้นอ้อยมีอายุ 2, 4, 6 และ 8 เดือน หลังจากเติมสาร EDTA แล้วโดยนำดินหลังจากการเก็บเกี่ยวมาทำการคลุกเคล้าให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นแบ่งดินออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) นำดินผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 2-3 ชั่วโมง และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร นำไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้าในดิน (EC) และค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน - รีดักชัน (Oxidation - Reduction Potential; ORP) 2) นำดินไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 - 48 ชั่วโมง นำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด และสังกะสีทั้งหมด

2) การเก็บตัวอย่างอ้อย โดยทำการเก็บตัวอย่างอ้อยในช่วงที่ต้นอ้อยมีอายุ 2, 4, 6 และ 8 เดือน หลังจากเติมสาร EDTA แล้วนำอ้อยมาล้างน้ำให้สะอาดด้วยน้ำประปา 3-4 ครั้ง และล้างด้วยน้ำกลั่น ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 2-3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ราก ท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย และใบ นำไปชั่งน้ำหนักสด และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 - 48 ชั่วโมง และนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นบดพีชแยกส่วนให้ละเอียดเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด และสังกะสีทั้งหมด

3) การเก็บตัวอย่างน้ำอ้อย โดยทำการเก็บตัวอย่างลำต้นของอ้อยในช่วงที่มีอายุ 2, 4, 6 และ 8 เดือน หลังจากเติมสาร EDTA แล้วนำลำต้นมาล้างน้ำให้สะอาดด้วยน้ำประปา 3-4 ครั้ง และล้างด้วยน้ำกลั่น ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 2-3 ชั่วโมง จากนั้นนำลำต้นมาคั้นน้ำได้เป็นน้ำอ้อย เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด และสังกะสีทั้งหมด

4) การเก็บตัวอย่างน้ำที่ชะออกมาจากถุงพลาสติกชั้นใน โดยทำการเก็บตัวอย่างทุก 2, 4, 6 และ 8 เดือน หลังจากเติมสาร EDTA โดยน้ำชะนั้นจะทำการวัดปริมาตรทั้งหมดก่อน จากนั้นทำการเก็บใส่ขวดปริมาตร 200 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด โดยขวดแรกใส่กรดไนตริก (HNO_3) 65% จำนวน 2-3 หยด นำเข้าตู้เย็นแล้วนำมาวิเคราะห์หาแคดเมียมทั้งหมด และสังกะสีทั้งหมด สำหรับตัวอย่างน้ำขวดที่สองไม่ต้องเติมกรดใดๆ นำมาแช่ตู้เย็น และนำมาทำการวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และ ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน - รีดักชัน (Oxidation - Reduction Potential; ORP)

5) การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของอ้อย เพื่อศึกษาผลของ EDTA ถึงความเป็นพิษต่อการเจริญเติบโตของอ้อย โดยทำการเก็บข้อมูลทุก 2, 4, 6 และ 8 เดือน หลังจากเติมสาร EDTA ด้วยการวัดความสูงต้น ความยาวราก และน้ำหนักแห้งของทุกส่วนของอ้อย

3.4.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในดิน

การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในดิน ทำโดยนำตัวอย่างดินที่ผ่านการอบ และร่อนแล้ว ซึ่งน้ำหนักจำนวน 0.5 กรัม แล้วนำมาย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 37% จำนวน 9 มิลลิลิตร กับกรดไนตริก (HNO_3) 65% จำนวน 3 มิลลิลิตร ตามวิธีการของ USEPA method 3052 (USEPA, 1996) ด้วยเครื่องมือสำหรับย่อยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) และวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)

2) การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Available)

การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ทำโดยนำตัวอย่างดินที่ผึ่งลมจนแห้ง มาบด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร แล้วชั่งน้ำหนัก จำนวน 10 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำยาสกัด DTPA (ภาคผนวก ข) จำนวน 20 มิลลิลิตร ปิดขวดให้สนิทด้วยพาราฟิล์ม นำไปเข้าเครื่องเขย่าแบบหมุนวน โดยใช้ความเร็วเท่ากับ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C โดยใช้ปั๊มดูดอากาศช่วยในการกรอง ไม่ต้องปรับปริมาตร เติมน้ำยาละลายที่ได้จากการกรองลงในขวด เพื่อนำไปหาแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์ (กรมวิชาการเกษตร, 2544: 72-75)

3) การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของพืช

การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย ทั้งหมด 4 ส่วน คือ ราก ท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย และใบ ทำการวิเคราะห์โดยใช้ตัวอย่างพืชที่ผ่านการบดละเอียดแล้ว ซึ่งน้ำหนัก 0.5 กรัม ย่อยด้วยกรดไนตริก (HNO_3) 65% จำนวน 8 มิลลิลิตร กับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

(H₂O₂) 30% จำนวน 2 มิลลิลิตร ตามวิธีการของ USEPA method 3052 (USEPA, 1996) ด้วยเครื่องมือสำหรับย่อยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) และวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)

4) การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในน้ำอ้อย

การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในน้ำอ้อย ใช้วิธีการย่อยด้วยเตาไฟฟ้า โดยตวงน้ำอ้อยปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ ย่อยด้วยกรดเข้มข้นผสมรวมกัน 3 ชนิด (Ternary Mixture Acids Digestion) คือ กรดไนตริกเข้มข้น (HNO₃) : กรดซัลฟูริกเข้มข้น (H₂SO₄) : กรดเปอร์คลอริก (HClO₄) ในอัตราส่วนเท่ากับ 10 : 1 : 4 (Jackson, 1973: 331-334) และหาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในน้ำอ้อยด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)

5) การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในน้ำชะ

การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในน้ำชะ ทำโดยตวงน้ำชะ 45 มิลลิลิตร แล้วนำมาย่อยด้วยกรดไนตริก (HNO₃) 65% จำนวน 5 มิลลิลิตร ตามวิธีการของ USEPA method 3015A (USEPA, 1998) ด้วยเครื่องมือสำหรับย่อยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) และวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)

3.4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลปริมาณการดูดตั้งและสะสมแคดเมียม และสังกะสีที่ได้จากการทดลอง โดยใช้ ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ทั้งนี้ การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิตินี้จะปฏิบัติการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติคือ Statistical Package for the Social Science (SPSS)

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินทดลอง

ดินที่ใช้ในการวิจัยเก็บมาจากพื้นที่ดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมมากกว่า 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม บริเวณตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก จากการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของดินทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 พบว่า ลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วน (Loam Soils) โดยมีอัตราส่วนของอนุภาคทราย: อนุภาคทรายแป้ง: อนุภาคดินเหนียว เท่ากับ 43.00: 43.40: 22.60 ดินมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.6 ซึ่งถือได้ว่าดินมีความเป็นด่างเล็กน้อย (Slightly Alkaline) (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ซึ่งอาจเกิดจากอิทธิพลจากดินตะกอนที่ทับถมและการฟุ้งสลายของหินเนื้อหยาบ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2539 อ้างถึงใน อนงนาฏศรีประโชติ, 2549) สำหรับค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดินมีค่าเท่ากับ 7.50 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.19 เดซิซีเมนต่อเมตร แสดงได้ว่าดินไม่เค็ม จึงไม่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืช (กลุ่มวิจัยเกษตรเคมี กรมวิชาการเกษตร, 2553) ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน อยู่ที่ระดับ 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ามีค่าสูงปานกลาง เมื่อประเมินในระดับของดินไร่อ้อย (ปรีชา พรหมณีย์, 2541) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ 0.15 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้เท่ากับ 7.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้เท่ากับ 62.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในดินทดลอง มีค่าเท่ากับ 136.47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเกินกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมที่กำหนดไว้ให้ไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2547) สำหรับปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีในดินทดลอง มีค่าเท่ากับ 4,137.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของดินทดลอง

คุณสมบัติดิน	หน่วย	ค่าที่วิเคราะห์ได้
ปริมาณอนุภาคทราย (Sand)	เปอร์เซ็นต์	43.00
ปริมาณอนุภาคทรายแป้ง (Silt)	เปอร์เซ็นต์	43.40
ปริมาณอนุภาคดินเหนียว (Clay)	เปอร์เซ็นต์	22.60
เนื้อดิน (Soil Texture)	-	ดินร่วน
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	7.6
ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของดิน (Cation Exchange Capacity)	เซนติโมลต่อกิโลกรัม	7.50
ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)	เดซิซีเมนต่อเมตร	0.19
ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic Matter)	เปอร์เซ็นต์	3.00
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen)	เปอร์เซ็นต์	0.15
ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ (Available Phosphorus)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	7.00
ปริมาณโพแทสเซียมที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ (Available Potassium)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	62.00
ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน (Total Cd)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	136.47
ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน (Total Zinc)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	4,137.43

เมื่อทำการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของดินทดลองแล้ว จึงนำดินทดลองที่ได้มาทำการทดลองตามวิธีการที่แสดงไว้ในบทที่ 3 หลังจากนั้นจึงทำการตรวจวัดคุณสมบัติของดิน ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential: ORP) โดยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

4.1.1 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในดิน

จากการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในดิน (ตารางที่ 4.2) พบว่า ทุกชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA ได้แก่ 0 (ควบคุม), 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าพีเอชในแต่ละเดือนอยู่ในช่วง 7.4-8.0 โดยค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน ตามลำดับ และในทุกระดับความเข้มข้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) โดยพบว่า ในทุกระดับความเข้มข้นที่ระยะเวลา 4 เดือน ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มี

แนวโน้มต่ำลงเล็กน้อยจากเดือนที่ 2 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเป็นช่วงฤดูฝน ประกอบกับมีการใช้
 ฤกษ์พลาสติคหุ้มถุงทดลองไว้ จึงทำให้น้ำขังอยู่ในถุงไม่สามารถออกสู่ภายนอกได้ ดินจึงมีการอุ้มน้ำ
 ไว้มาก ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ดินมีค่าพีเอชต่ำลง ทั้งนี้ดินที่เหมาะสมสำหรับการปลูกอ้อยควรมี
 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 6.0-7.5 เพราะธาตุอาหารในดินจะละลายออกมาให้อ้อย
 นำไปใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด ดินที่เป็นกรดจัดหรือด่างจัดเกินไปจะทำให้ธาตุอาหารบางชนิดไม่
 ละลายออกมาให้อ้อยดูดไปใช้ได้ และธาตุอาหารบางชนิดที่ละลายออกมามากเกินไปจนเป็นพิษแก่
 อ้อย (ปรีชา พรหมณี, 2541) ทั้งนี้ดินที่มีความเป็นกรด-ด่าง (pH) เพิ่มขึ้นอาจทำให้พืชดูดตั้ง
 แคดเมียมในสารละลายดินได้ลดลง ดังเช่นการศึกษาของ Jinadasa et al. (1997) ที่ทำการศึกษาดิน
 ที่ปลูกผักในออสเตรเลีย พบว่า ดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 6.8 และมีปริมาณ
 แคดเมียมในดินสูง เท่ากับ 6.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในผักที่ปลูกใน
 พื้นที่เพียงเล็กน้อย เช่น แรดิช (Radish) มีปริมาณการสะสมแคดเมียมเพียง 0.001 มิลลิกรัมต่อ
 กิโลกรัม ในขณะที่อีกพื้นที่หนึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 4.4 และมีปริมาณแคดเมียมใน
 ดินเท่ากับ 1.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ผักกะหล่ำที่ปลูกในบริเวณนั้นมีปริมาณการสะสม
 แคดเมียมถึง 0.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 4.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในดิน

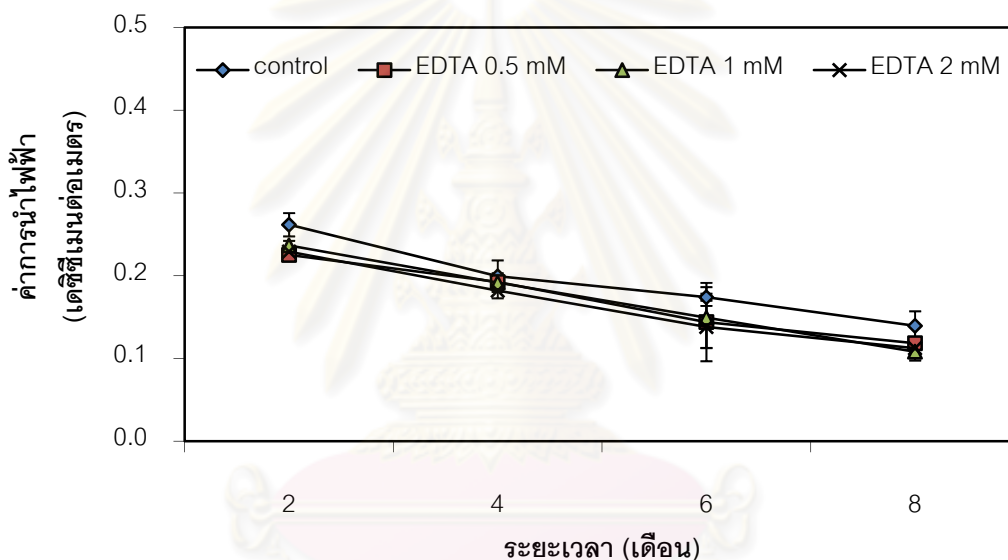
ระยะเวลา (เดือน)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในดิน			
	ควบคุม	EDTA 0.5 mM	EDTA 1 nM	EDTA 2mM
2	7.7 ^{ac} ± 0.15	7.8 ^a ± 0.04	7.9 ^a ± 0.00	8.0 ^a ± 0.05
4	7.4 ^b ± 0.05	7.5 ^b ± 0.08	7.5 ^b ± 0.05	7.6 ^b ± 0.05
6	7.7 ^a ± 0.10	7.7 ^a ± 0.22	7.8 ^c ± 0.01	7.8 ^a ± 0.17
8	7.9 ^c ± 0.03	7.9 ^a ± 0.03	8.0 ^a ± 0.15	8.0 ^a ± 0.22

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวดิ่ง บอกรายความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.1.2 ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ในดิน

การวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC) ในดินเป็นการศึกษาถึงความเค็ม (Salinity) ของดิน ซึ่งมีผล
 ต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยค่าการนำไฟฟ้าจะผันแปรตามปริมาณไอออนบวก และไอออนลบ
 หรือปริมาณเกลือในสารละลาย และอุณหภูมิของสารละลาย ซึ่งดินที่มีค่าการนำไฟฟ้า (EC)
 มากกว่า 4 เดซิซีเมนต่อเมตร จัดว่าเป็นดินเค็ม (Saline Soil) (นงลักษณ์ ปุระณะพงษ์, 2548) และ

จากการศึกษาค่าการนำไฟฟ้า (EC) ในดินของงานวิจัยครั้งนี้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน พบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 2 เดือน ในทุกชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA ได้แก่ 0 (ควบคุม), 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าการนำไฟฟ้า (EC) ในดินมากที่สุดเท่ากับ 0.26, 0.23, 0.24, 0.23 เดซิซีเมนต่อเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่า ในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มของค่าการนำไฟฟ้าลดลงเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น เนื่องจากช่วงแรกของการทดลอง ยังมีปริมาณสารละลายพวกที่มีประจุ (Electrolyte) ต่างๆ อยู่ในสารละลายดินมาก (อนนท์ สุขสวัสดิ์, 2547 อ้างถึงในทิพวรรณ พจนานภรณ์, 2552) ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของดินสูง แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น สารละลายพวกที่มีประจุ (Electrolyte) เหล่านั้นจะถูกดูดซับโดยพืชทำให้มีปริมาณลดลง ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าในดินลดลงด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.1 ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ในดินที่ระยะเวลาต่างๆ

4.1.3 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential; ORP) ในดิน

ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน เป็นค่าที่บ่งบอกถึงสภาวะการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันในดิน ตามปกติการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สำคัญในดินที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ส่วนก๊าซออกซิเจนและสารประกอบต่างๆ ในดินจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (เกิดปฏิกิริยารีดักชัน) (ไพบูลย์ วิวัฒน์วงษ์นา, 2546) จากการศึกษาค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในดิน ดังตารางที่ 4.3 โดยทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน พบว่า มีค่าเป็นบวก โดยมีค่าค่อนข้างสูง และที่

ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 8 เดือน ในทุกชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA ได้แก่ 0 (ควบคุม), 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในดินมากที่สุดเท่ากับ 249.57, 253.93, 260.37, 263.23 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่า ในทุกชุดการทดลอง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น และในทุกระดับความเข้มข้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ทั้งนี้ค่าที่วัดได้แสดงถึงดินมีการระบายน้ำได้ดี ไม่มีสภาพน้ำขัง อยู่ในสภาวะแบบ Oxidizing แคตเมียมและสังกะสีจะอยู่ในรูปแคตเมียมไอออนและสังกะสีไอออน ซึ่งทำให้รากพืชสามารถดูดตั้งได้มาก (อนงนาฏ ศรีประโชติ, 2549)

ตารางที่ 4.3 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential; ORP) ในดิน

ระยะเวลา (เดือน)	ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในดิน (mV)			
	ควบคุม	EDTA 0.5 mM	EDTA 1 mM	EDTA 2mM
2	131.60 ^a ±9.97	151.23 ^a ±1.50	155.80 ^a ±4.80	173.10 ^a ±1.64
4	171.97 ^b ±11.72	183.30 ^b ±6.78	184.97 ^b ±7.78	193.60 ^b ±5.13
6	206.40 ^c ±12.18	226.77 ^c ±4.79	230.87 ^c ±7.24	242.87 ^c ±5.16
8	249.57 ^d ±1.35	253.93 ^d ±2.23	260.37 ^d ±3.55	263.23 ^d ±3.15

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2 ลักษณะของน้ำชะ

น้ำชะเกิดจากการรดน้ำต้นไม้หรือน้ำฝนที่ตกลงมายังภาชนะที่ได้ดำเนินการปลูกพืชทดลองไว้ แล้วเกิดมีน้ำที่ชะออกมาจากถุงพลาสติกชั้นใน โดยเก็บสะสมอยู่ในถุงพลาสติกใสชั้นนอกที่หุ้มถุงพลาสติกชั้นในไว้ และมีการดึงน้ำดังกล่าวกลับไปรดต้นไม้ในทุกๆ วันจนหมด จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างทุก 2, 4, 6 และ 8 เดือน หลังจากเติมสาร EDTA โดยน้ำชะนั้นจะทำการวัดปริมาตรทั้งหมดก่อน แล้วนำมาทำการวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในน้ำชะ ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน - รีดักชัน (Oxidation - Reduction Potential; ORP) และ ปริมาณการสะสมแคตเมียมและสังกะสีในน้ำชะ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในน้ำชะ

การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในน้ำชะ (ตารางที่ 4.4) พบว่า ในทุกชุดการทดลองที่ได้สาร EDTA ได้แก่ 0 (ควบคุม), 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าอยู่ในช่วง 6.9-8.2 โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น โดยในแต่ละเดือนมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) โดยพบว่า ที่ระยะ 4 เดือนของการเก็บตัวอย่างในทุกระดับความเข้มข้น มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ต่ำลงเล็กน้อยจากเดือนที่ 2 อาจเนื่องจากเป็นช่วงฤดูฝน ซึ่งน้ำฝนที่เกิดจากการควบแน่นในบรรยากาศควรมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 7 หรือใกล้เคียง อย่างไรก็ตามก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติในบรรยากาศละลายเข้าไปในหยดน้ำฝนกลายเป็นกรดอ่อนคาร์บอนิก ทำให้น้ำฝนตามธรรมชาติมีความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 5.6 (สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ, 2553)

ตารางที่ 4.4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในน้ำชะ

ระยะเวลา (เดือน)	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ในน้ำชะ			
	ควบคุม	EDTA 0.5 mM	EDTA 1 mM	EDTA 2 mM
2	7.2 ^a ± 0.06	7.3 ^a ± 0.07	7.3 ^a ± 0.10	7.4 ^a ± 0.06
4	6.9 ^a ± 0.52	7.0 ^b ± 0.06	7.1 ^a ± 0.18	7.2 ^{ab} ± 0.09
6	7.4 ^{ab} ± 0.28	7.6 ^c ± 0.08	7.6 ^b ± 0.21	7.8 ^{bc} ± 0.08
8	7.9 ^b ± 0.11	7.9 ^d ± 0.05	8.0 ^c ± 0.10	8.2 ^c ± 0.60

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกราคาแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2.2 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential; ORP) ในน้ำชะ

จากการศึกษาค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำชะ (ตารางที่ 4.5) โดยทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน พบว่า ในทุกชุดการทดลองมีค่าเป็นบวก และค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 242-331 มิลลิโวลต์ แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างน้ำชะมีแนวโน้มในการรับอิเล็กตรอน ซึ่งอาจเกิดจากการชะละลายของแคดเมียม และสังกะสี ปนอยู่ในน้ำ ทั้งนี้ Cd^{2+} และ Zn^{2+} เป็นตัว Oxidant ที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้ ซึ่งคล้ายกับกรณีของน้ำที่มีกรดโครมิก (H_2CrO_4) หรือเกลือไดโครเมต เช่น $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ซึ่งมีโครเมียม +6 (Cr^{6+}) จึงทำให้มีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันเป็นบวกโดยมีค่า

หลายร้อยมิลลิโวลต์ ซึ่งเกิดจากโครเมียม +6 (Cr^{6+}) เป็น Oxidant ที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้ (มันสิ้น ต้นทุลเวศม์, 2545)

ตารางที่ 4.5 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential; ORP) ในน้ำชะ

ระยะเวลา (เดือน)	ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในน้ำชะ (mV)			
	ควบคุม	EDTA 0.5 mM	EDTA 1 mM	EDTA 2mM
2	242.90 ^a ±11.72	266.70 ^a ±9.43	275.67 ^a ±11.33	282.87 ^a ±12.85
4	258.23 ^b ±10.84	251.83 ^a ±8.03	312.13 ^{ab} ±4.41	331.00 ^a ±11.29
6	313.27 ^b ±1.77	302.77 ^b ±12.37	289.23 ^{bc} ±9.25	280.80 ^a ±6.46
8	278.60 ^b ±8.57	270.37 ^c ±7.30	262.23 ^c ±8.78	317.67 ^b ±9.66

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2.3 ปริมาณการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในน้ำชะ

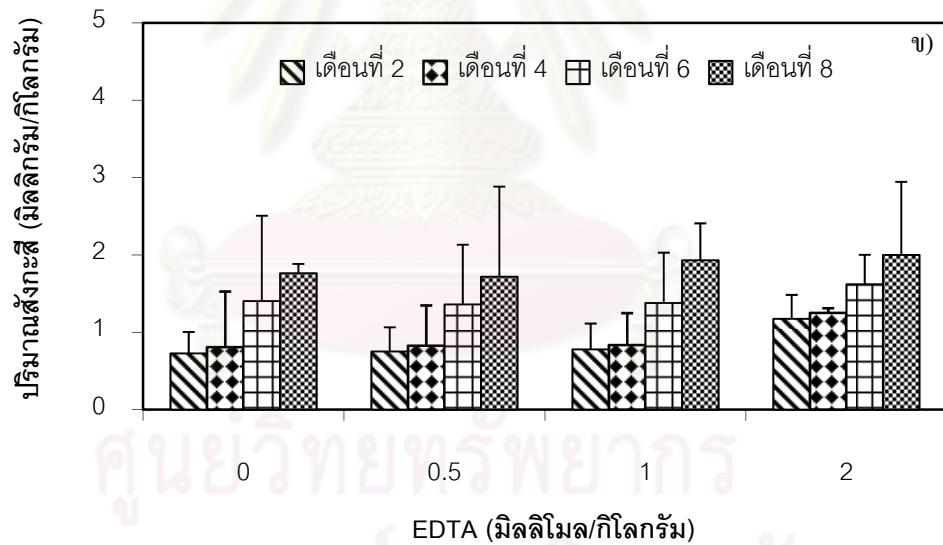
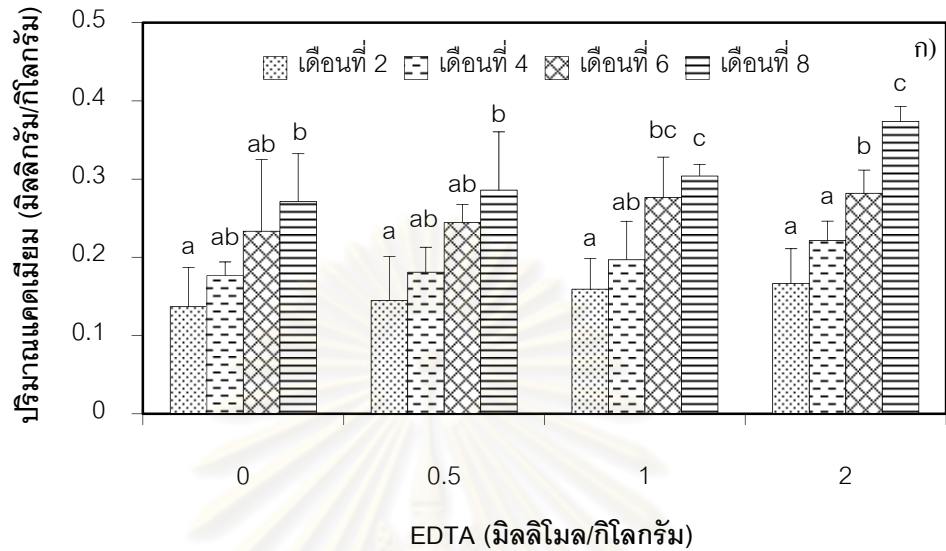
1) ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำชะ

ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำชะ (รูปที่ 4.2ก) พบว่า ทุกชุดการทดลองที่ใส่ สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น ได้แก่ 0 (ควบคุม), 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือนตามลำดับ โดยในแต่ละเดือนมีค่าการสะสมแคดเมียมที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) โดยพบว่า ที่ระยะเวลาการทดลอง 8 เดือนมีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมมากที่สุด คือ 0.27, 0.29, 0.30 และ 0.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของระดับความเข้มข้นของ EDTA ที่ 0, 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

2) ปริมาณการสะสมสังกะสีในน้ำชะ

จากรูปที่ 4.2 ข พบว่า ปริมาณการสะสมสังกะสีในน้ำชะของทุกชุดการทดลอง มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน โดยในแต่ละเดือนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้ที่ระยะเวลาการทดลอง 8 เดือนมีปริมาณความ

เข้มข้นของสังกะสีมากที่สุด คือ 1.76, 1.72, 1.93 และ 2.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ของระดับความเข้มข้นของ EDTA ที่ 0, 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน



รูปที่ 4.2 การสะสมโลหะหนักในน้ำชะ ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3) ก) แคลเซียม และ ข) สังกะสี

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT

ตารางที่ 4.6 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำชะ ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำชะ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
0	0.14±0.05	0.18±0.02	0.23±0.09	0.27±0.06
0.5	0.14±0.06	0.18±0.03	0.24±0.02	0.29±0.07
1	0.16±0.04	0.20±0.05	0.28±0.05	0.30±0.01
2	0.17±0.04	0.22±0.03	0.28±0.03	0.37±0.02

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวดิ่ง บอกระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.7 ปริมาณการสะสมสังกะสีในน้ำชะ ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณการสะสมสังกะสีในน้ำชะ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
0	0.73±0.28	0.81±0.72	1.40±1.10	1.76±0.12
0.5	0.75±0.31	0.83±0.52	1.36±0.77	1.72±1.17
1	0.78±0.33	0.83±0.41	1.38±0.65	1.93±0.48
2	1.17±0.31	1.25±0.06	1.62±0.38	2.00±0.95

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวดิ่ง บอกระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 4.6 และ 4.7 แสดงให้เห็นถึงผลของระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ต่อการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในน้ำชะเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น พบว่า ในทุกระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน ปริมาณการสะสมแคดเมียมและสังกะสีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยปริมาณการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในน้ำชะ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระดับความเข้มข้นของ EDTA เพิ่มขึ้น โดยที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ที่ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากกว่าทุกระดับความเข้มข้น โดยมีค่าเท่ากับ 0.17, 0.22, 0.28 และ 0.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน ในส่วนของปริมาณการสะสมสังกะสีในน้ำชะ

พบว่า มีปริมาณการชะละลายของสังกะสีในน้ำชะมีมากกว่าแคดเมียม ทั้งนี้ที่ระดับความเข้มข้นของ EDTA ที่ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีปริมาณการสะสมสังกะสีในน้ำชะมากที่สุด เท่ากับ 1.17, 1.25, 1.62 และ 2.00 ตามระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน ตามลำดับ จากปริมาณการสะสมของแคดเมียมและสังกะสีในน้ำชะ พบว่า ทั้งแคดเมียมและสังกะสี มีการชะละลายออกมากับน้ำได้น้อย เนื่องจากแคดเมียมและสังกะสีเป็นธาตุที่มีการละลายได้ค่อนข้างดีในสภาพดินเป็นกรด ซึ่งจะเกิดการชะละลายสูง (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) ทั้งนี้จากค่าความเป็นกรด-ด่างทั้งในดินและน้ำชะของการทดลอง พบว่า มีค่าเป็นกลางถึงด่างอ่อน จึงทำให้แคดเมียมและสังกะสี ชะละลายออกมากับน้ำได้น้อย

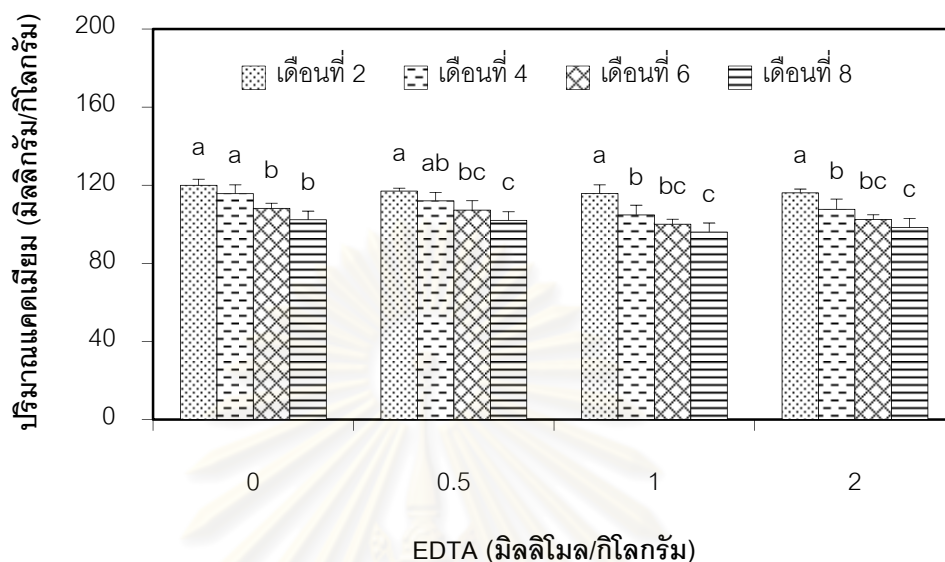
4.3 ผลของสาร EDTA ต่อการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในดิน

การศึกษาผลของสาร EDTA ต่อการดูดซับแคดเมียมและสังกะสี ของอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน โดยทำการปลูกอ้อย ลงในภาชนะปลูกที่เตรียมดินสำหรับการปลูก 10 กิโลกรัมต่อภาชนะ ทำการรดน้ำ และดูแลรักษาจนกว่าตาอ้อยงอกและเจริญเติบโตเป็นระยะเวลา 1 เดือน เพื่อเป็นการยืนยันว่า ต้นอ้อยที่ใช้ในการทดลองนี้มีอัตราการรอด 100 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการเติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 4 ระดับ ได้แก่ 0 (ควบคุม), 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ดูแลรักษา รดน้ำ ตลอดระยะเวลาในการทดลอง จนครบระยะเวลาการศึกษาที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน (นับจากการเติมสาร EDTA) ทั้งนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มไปทำการวิเคราะห์ เพื่อหาปริมาณแคดเมียม และสังกะสีที่เหลืออยู่ในดินทดลอง รวมทั้ง แคดเมียม และสังกะสีในดินที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Available) ตามระยะเวลาของการศึกษาดังกล่าว

4.3.1 ผลของสาร EDTA ต่อการสะสมแคดเมียมในดิน

การศึกษาปริมาณการสะสมของแคดเมียมในดินที่มีการใส่สาร EDTA ในดินที่ความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน พบว่า ในแต่ละเดือนของทุกระดับความเข้มข้น มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.3 โดยปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินทุกระดับความเข้มข้นของสาร EDTA มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ที่ระยะเวลา 2 เดือน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 119.97, 117.02, 115.82 และ 116.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ และพบว่า การสะสมแคดเมียมในดินมีค่าน้อยที่สุดที่ระยะเวลา 8 เดือน มีค่าเท่ากับ 102.36, 102.05,

96.08 และ 98.34 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 การสะสมแคดเมียมในดิน ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT

ตารางที่ 4.8 ปริมาณการสะสมของแคดเมียมทั้งหมดในดิน ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
ควบคุม	119.97±3.15	115.75 ^a ±4.48	108.19 ^a ±2.63	102.36± 4.44
0.5	117.02±1.55	112.08 ^{ab} ±4.25	107.27 ^a ±4.82	102.05± 4.38
1	115.82±4.35	104.85 ^b ±4.98	100.05 ^b ±2.61	96.08± 4.64
2	116.17±1.93	107.73 ^{ab} ±5.22	102.55 ^{ab} ±2.33	98.34±98.34

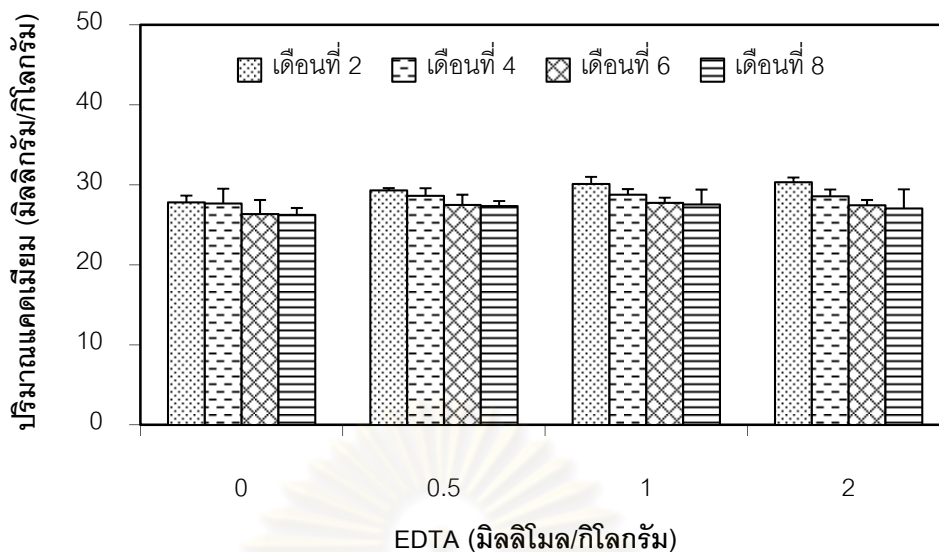
หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.8 เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณการสะสมของแคดเมียมทั้งหมดในดินตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA พบว่า ในทุกระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน ปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในดินมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ตามปริมาณการใส่สาร EDTA นอกจากนี้ยังพบว่า ในชุดควบคุมมีปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในดินมากกว่าในชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยมีค่าเท่ากับ 119.97, 115.75, 108.19 และ 102.36 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าแคดเมียมที่ลดลงในดินอาจเนื่องมาจากอ้อยมีการดูดดึง และนำไปสะสมในพืชเพิ่มขึ้น อีกทั้งแคดเมียมยังถูกเคลื่อนย้ายโดย EDTA ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lai และ Chen (2003) พบว่า เมื่อเติม EDTA ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินมีผลทำให้ต้นฝ้ายมีการดูดดึงและนำแคดเมียมไปสะสมได้เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ปริมาณแคดเมียมในดินลดลง

4.3.2 ผลของสาร EDTA ต่อปริมาณแคดเมียมในดินที่พืชดูดดึงได้ (Available)

การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ ได้แก่ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ รูปคีเลต หรือถูกดูดซับ รวมถึงรูปสารประกอบเชิงซ้อน (นงลักษณ์ ปุระณะพงษ์, 2548) ซึ่งในการศึกษาต้องใส่สารที่มีสมบัติเป็นกรดอ่อน เป็นกลาง และเป็นสารคีเลต เพื่อใช้ในการสกัดแคดเมียมออกจากดิน (Adriano, 2001) โดยในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้สารสกัด DTPA โดยเริ่มจากการสุ่ม และเก็บตัวอย่างดินทดลอง ที่ได้มีการเติมสาร EDTA 4 ระดับ ได้แก่ 0, 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาการศึกษา 2, 4, 6 และ 8 เดือน ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณแคดเมียมในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในทุกระดับความเข้มข้นของสาร EDTA เมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างอ้อยต่างกัน ดังรูปที่ 4.4 ทั้งนี้ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 2 เดือน มีปริมาณแคดเมียมในดินที่พืชสามารถดูดดึงได้มากที่สุด คือ 27.81, 29.31, 30.11 และ 30.34 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 4.9 แสดงผลปริมาณแคดเมียมในดินที่พืชสามารถดูดดึงได้ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA พบว่า ที่ระยะเวลา 2 เดือน ในชุดควบคุมมีความแตกต่างกับชุดการทดลองที่มีการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) แต่ที่ระยะเวลา 4, 6 และ 8 เดือนในทุกชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 4.4 ปริมาณแคดเมียมในดินที่พืชดูดตั้งได้ (Available) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT

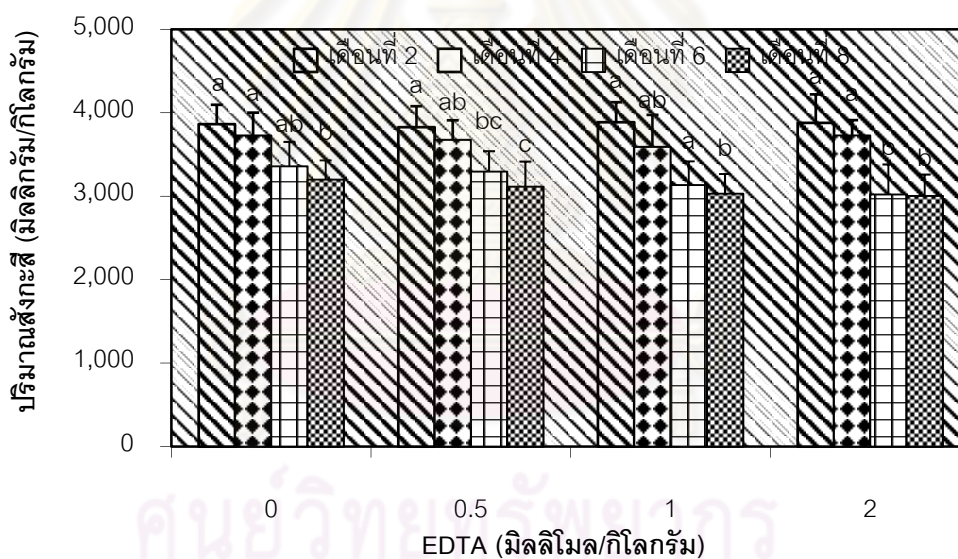
ตารางที่ 4.9 ปริมาณแคดเมียมในดินที่พืชดูดตั้งได้ (Available) ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
0	27.81 ^a ±0.85	27.68±1.85	26.36±1.76	26.25±0.86
0.5	29.98 ^b ±0.60	28.63±0.95	26.83±1.76	26.68±1.15
1	30.11 ^b ±0.90	28.78±0.70	27.76±0.64	27.56±1.86
2	30.34 ^b ±0.59	28.58±0.85	27.45±0.67	27.07±2.38

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.3.3 ผลของสาร EDTA ต่อการสะสมสังกะสีในดิน

ปริมาณการสะสมของสังกะสีในดินที่มีการเติม EDTA ในดินที่ความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน พบว่าในแต่ละเดือนของทุกระดับความเข้มข้น มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.5 โดยปริมาณการสะสมสังกะสีในดินทุกระดับความเข้มข้นของ EDTA มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ที่ระยะเวลา 2 เดือน มีปริมาณการสะสมสังกะสีในดินมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 3,864.28, 3,828.54, 3,887.35 และ 3,880.53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ และพบว่า การสะสมสังกะสีในดินมีค่าน้อยที่สุดที่ระยะเวลา 8 เดือน มีค่าเท่ากับ 3,200.76, 3,116.97, 3,031.52 และ 3,005.63 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 การสะสมสังกะสีในดิน ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT

เมื่อทำการศึกษาถึงระดับของสาร EDTA ดังตารางที่ 4.10 พบว่า ที่ระยะเวลาการศึกษาเดียวกันของทุกชุดการทดลอง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ทั้งนี้พบว่า ในชุดควบคุมซึ่งไม่มีการใส่สาร EDTA จะมีปริมาณการสะสมสังกะสีทั้งหมดในดินมากกว่าในชุดการ

ทดลองที่ใส่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยมีค่าเท่ากับ 3,864.28, 3,729.50, 3,359.64 และ 3,200.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ชุดการทดลองมีแนวโน้มปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดินลดลงอย่างเห็นได้ชัด อาจเนื่องมาจากในการทดลองครั้งนี้ไม่มีการเติมปุ๋ยตลอดระยะเวลาการทดลอง ถึงแม้ในดินจะมีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ก็ตาม แต่อาจไม่เพียงพอที่จะทำให้ย่อยเจริญเติบโตได้ตลอดอายุการเก็บเกี่ยว ซึ่งสังกะสีจัดเป็นจุลธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ดังนั้นจึงจึงดูสังกะสีในรูป Zn^{2+} ไปใช้ในการเจริญเติบโต ซึ่งจัดเป็นโคเวเลนต์แคตไอออนที่มีสมบัติพิเศษ ที่สามารถเข้ารวมกับอินทรีย์สารกลายเป็นทรงแททราฮีดรอลคอมเพล็กซ์ (Tetrahedral Complexes) และเป็นสาเหตุให้สังกะสีมีบทบาทสำคัญเกี่ยวข้องกับเอนไซม์หลายชนิด นอกจากนี้ยังมีบทบาทเกี่ยวข้องกับโปรตีนและดีเอ็นเออีกด้วย (Coleman, 1992)

ตารางที่ 4.10 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
0	3,864.28±233.35	3,729.50±274.02	3,359.64±293.00	3,200.00±229.60
0.5	3,828.54±251.21	3,677.70±233.17	3,297.02±244.01	3,116.97±299.23
1	3,887.35±240.20	3,592.93±384.16	3,135.92±283.54	3,031.52±236.26
2	3,880.53±341.49	3,729.52±183.54	3,023.01±359.07	3,005.63±255.27

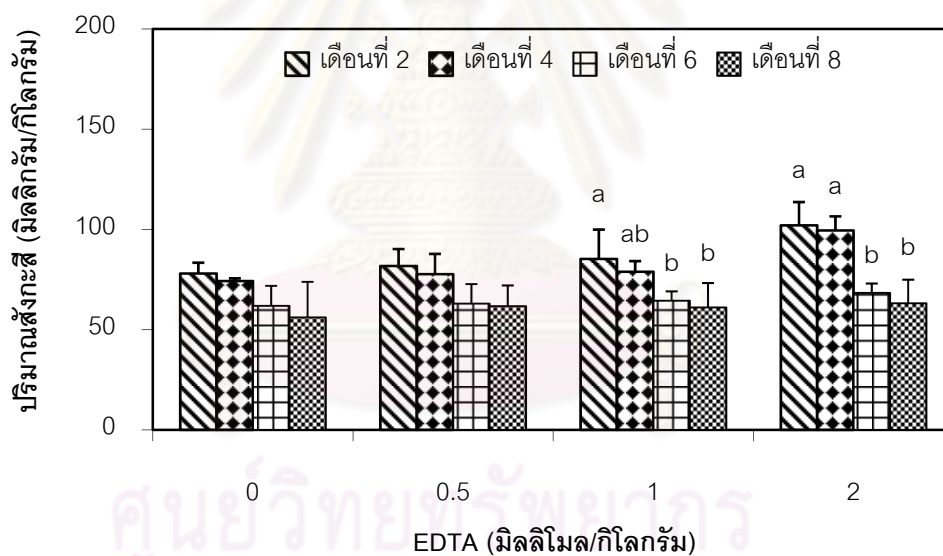
หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกรวมความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.3.4 ผลของสาร EDTA ต่อปริมาณสังกะสีในดินที่พืชดูดซับได้ (Available)

จากการศึกษาปริมาณสังกะสีในดินที่พืชสามารถดูดซับได้ พบว่า ปริมาณสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดซับได้ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ดังรูปที่ 4.6 สำหรับที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 0 (ควบคุม) และ 0.5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 2, 4, 6 และ 8 เดือน พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 2 เดือน มีปริมาณสังกะสีในดินในรูปที่พืชสามารถดูด

ตั้งได้มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 78.02, 81.77, 85.25 และ 102.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ โดยปริมาณสังกะสีในดินที่พืชสามารถดูดตั้งได้ในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น

สำหรับตารางที่ 4.11 แสดงปริมาณสังกะสีในดินที่พืชสามารถดูดตั้งได้ (Available) พบว่าที่ระยะเวลาของสารเก็บตัวอย่างที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน ของระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ทั้งนี้พบว่า ในชุดการทดลองที่การเติมสาร EDTA มีปริมาณสังกะสีในดินที่พืชสามารถดูดตั้งได้มากกว่าในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสาร EDTA โดยที่ชุดการทดลองที่มีการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีปริมาณสังกะสีมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 102.05, 99.50, 68.35 และ 63.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือนตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ปริมาณสังกะสีในดินที่พืชดูดตั้งได้ (Available) ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT

ตารางที่ 4.11 ปริมาณสังกะสีในดินที่พืชดูดตั้งได้ (Available) ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณสังกะสีในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
0	78.02±5.34	74.21±1.34	61.84±10.01	56.14±17.69
0.5	81.77±8.45	77.67±10.11	63.00±9.73	61.68±10.35
1	85.25±14.67	78.87±5.34	64.45±4.63	61.10±12.14
2	102.05±11.61	99.50±7.00	68.35±4.66	63.11±11.80

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.4 ผลของสาร EDTA ต่อการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย

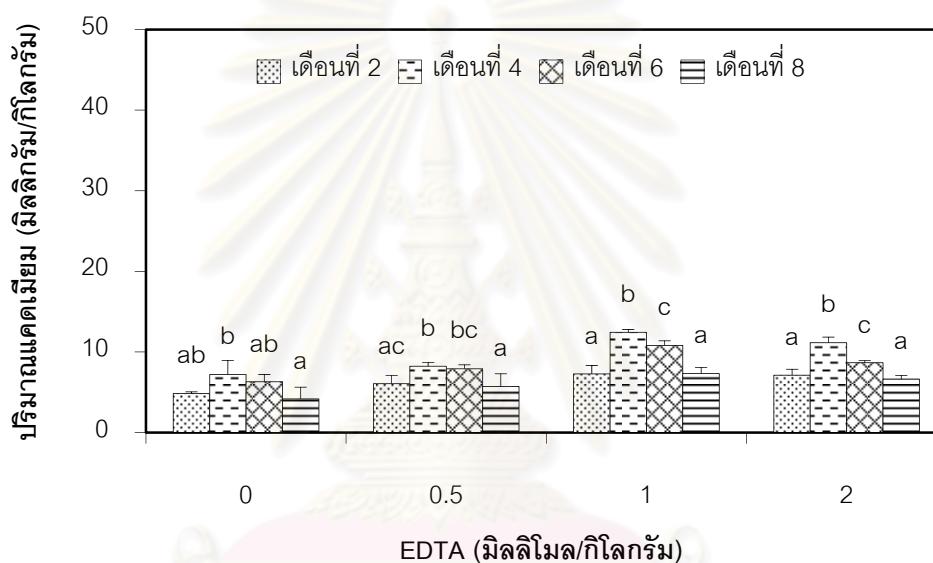
การศึกษาผลของสาร EDTA ต่อปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย ทั้งหมด 4 ส่วน คือ ราก ท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย และใบ โดยทำการเก็บตัวอย่างอ้อย ที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลของสาร EDTA ต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย

จากการศึกษาผลของสาร EDTA ต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย ได้แก่ ใบ ชานอ้อย ท่อนพันธุ์เดิม ราก และน้ำอ้อย พบว่า ที่ระยะเวลา 4 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ ใบมีการสะสมแคดเมียมมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 7.21, 8.24, 12.45 และ 11.16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.7 โดยปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบน้อยที่สุด ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 8 เดือนของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าเท่ากับ 4.18, 5.74, 7.31 และ 6.64 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 4 เดือน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 12.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับชานอ้อย พบว่า ที่ระยะเวลา 4 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความ

เข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดินตามลำดับ ขาน้อยมีการสะสม แคลเซียมมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 9.71, 10.40, 14.13 และ 12.75 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งค่าที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) โดยปริมาณการสะสม แคลเซียมในขาน้อยน้อยที่สุด ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 8 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการ เติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่า เท่ากับ 4.18, 5.74, 7.31 และ 6.64 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าชุดการ ทดลองที่ใส่สาร EDTA ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 4 เดือน มีปริมาณ การสะสมแคลเซียมในส่วนขาน้อยมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 14.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ใบและ ขาน้อยของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มของการสะสมแคลเซียมลดลงที่ระยะเวลา 6 และ 8 เดือน สำหรับในส่วนท่อนพันธุ์เดิม พบว่า ที่ระยะเวลา 6 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ใน ดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ท่อนพันธุ์เดิมมีการ สะสมแคลเซียมมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 11.07, 11.59, 16.76 และ 15.76 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งค่าที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ทั้งนี้ท่อนพันธุ์ เดิมของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มของการสะสมแคลเซียมลดลงที่ระยะเวลา 8 เดือน โดย ปริมาณการสะสมแคลเซียมในท่อนพันธุ์เดิม ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับ ความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าเท่ากับ 7.04, 7.68, 9.36 และ 8.72 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA ที่ ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 6 เดือน มีปริมาณการสะสมแคลเซียมในส่วน ท่อนพันธุ์เดิมมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 16.76 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนการศึกษาปริมาณการสะสม แคลเซียมในส่วนราก ดังรูปที่ 4.10 พบว่า ที่ระยะเวลา 6 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน รากมีการ สะสมแคลเซียมมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 49.09, 50.65, 57.52 และ 55.27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ทั้งนี้รากของทุกชุดการ ทดลองมีแนวโน้มของการสะสมแคลเซียมลดลงที่ระยะเวลา 8 เดือน โดยปริมาณการสะสม แคลเซียมในราก ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าเท่ากับ 36.57, 38.93, 41.97 และ 40.64 มิลลิกรัมต่อ กิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมล ต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 6 เดือน มีปริมาณการสะสมแคลเซียมในส่วนรากมากที่สุด มีค่า เท่ากับ 57.52 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ท่อนพันธุ์เดิมและรากของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มของ การสะสมแคลเซียมลดลงที่ระยะเวลา 8 เดือน ส่วนน้ำข้อย พบว่า จากผลการทดลองที่ระยะเวลา ของการเก็บตัวอย่าง 2 และ 4 เดือนนั้น พบว่า ต้นข้อยยังเล็ก และยังไม่มีการสร้างน้ำตาล จึงทำให้

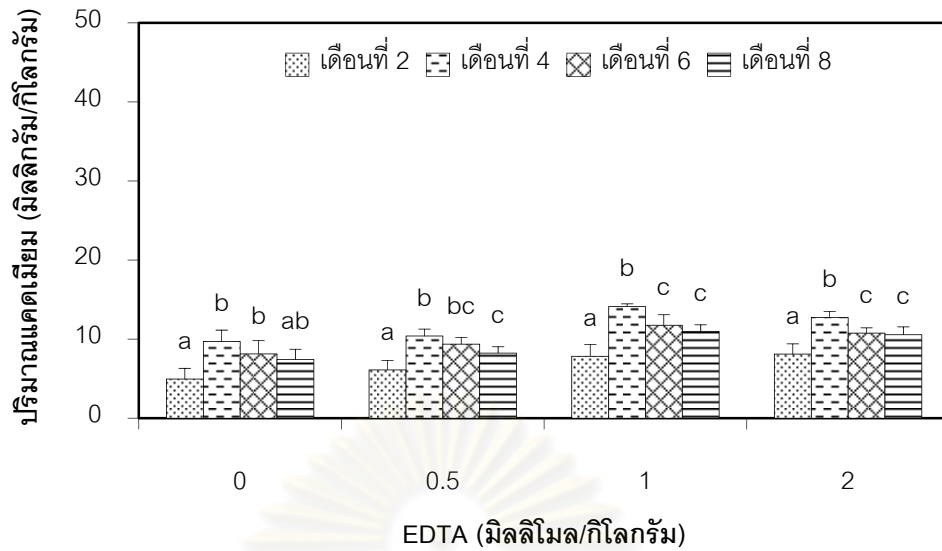
ไม่มีผลของน้ำอ้อยที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างดังกล่าว สำหรับผลของการสะสมแคดเมียมที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 และ 8 เดือน พบว่า ที่ระยะเวลา 8 เดือน การทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน น้ำอ้อยมีการสะสมแคดเมียมมากกว่าที่ระยะเวลา 6 เดือน โดยมีค่าเท่ากับ 0.18, 0.20, 0.23 และ 0.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (คำนวณจากความหนาแน่นของน้ำอ้อย 1.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, ภาคผนวก ก) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในส่วนน้ำอ้อยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาของการศึกษาเพิ่มมากขึ้น และไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.7 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใบที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

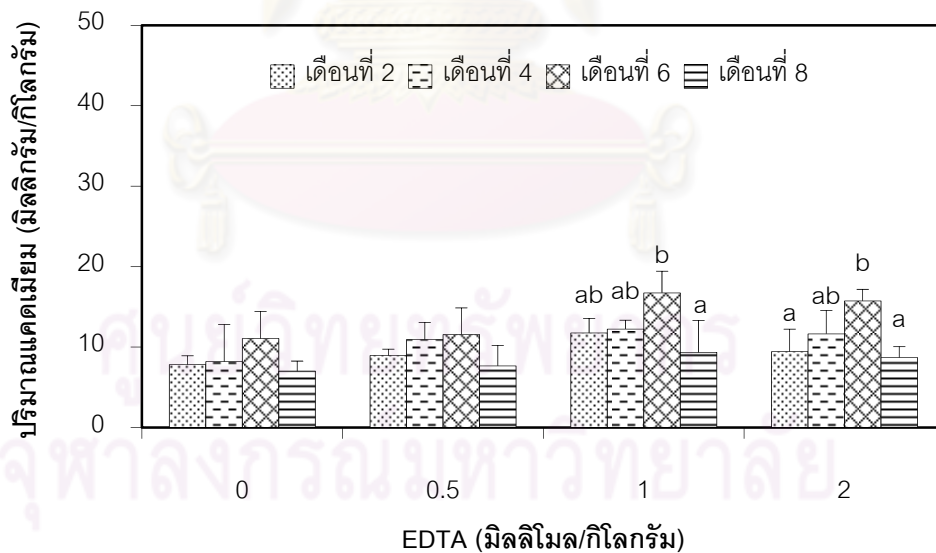
หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



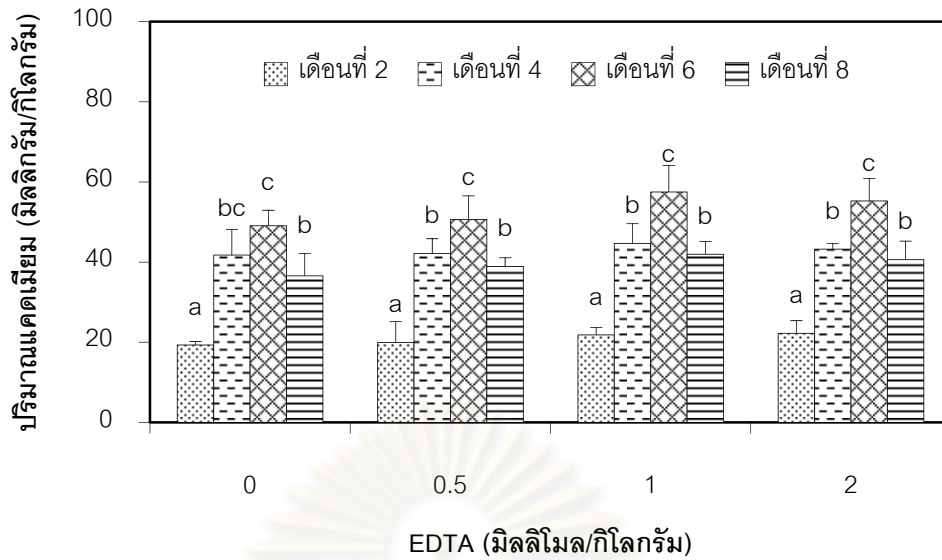
รูปที่ 4.8 ปริมาณการสะสมแคลเซียมในส่วนชานอ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT



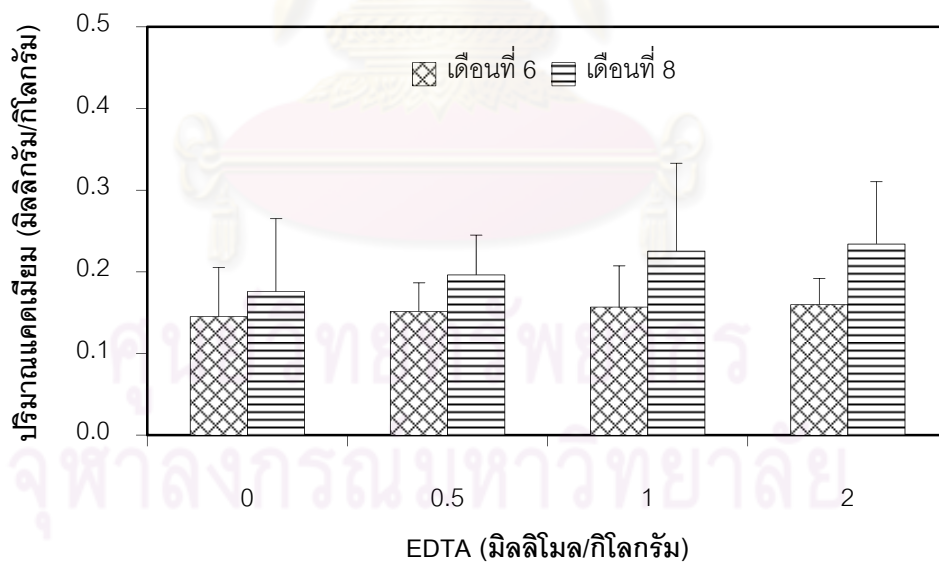
รูปที่ 4.9 ปริมาณการสะสมแคลเซียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT



รูปที่ 4.10 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนรอกที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT



รูปที่ 4.11 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนน้ำอ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT

จากตารางที่ 4.12 – 4.13 แสดงผลของระดับความเข้มข้นสาร EDTA ต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดในส่วนต่างๆ ของอ้อย พบว่า มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใบ และชานอ้อยในชุดการทดลองที่มีการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน โดยมีความแตกต่างกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสาร EDTA อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ซึ่งในส่วนใบของชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสาร EDTA จะมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใบน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 4.83, 7.21, 6.30 และ 4.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน ตามลำดับ และในส่วนชานอ้อย พบว่า ชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสาร EDTA มีปริมาณการสะสมแคดเมียมน้อยที่สุดเช่นกัน มีค่าเท่ากับ 4.95, 9.71, 8.14 และ 7.42 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสาร EDTA สามารถช่วยเพิ่มการดูดซับของแคดเมียมไปสะสมในส่วนใบ และชานอ้อยได้เพิ่มขึ้นสำหรับในส่วนท่อนพันธุ์เดิม ในทุกระดับความเข้มข้นของการเติมสาร EDTA ในระยะเวลาเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.14) ทั้งนี้พบว่าในชุดการทดลองที่มีการเติมสาร EDTA มีแนวโน้มของการสะสมแคดเมียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิมมากกว่าในชุดควบคุมตามแต่ละระยะเวลาเช่นเดียวกับในส่วนรากที่พบว่า ในทุกระดับความเข้มข้นของการเติมสาร EDTA ในระยะเวลาเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.15) แต่ทั้งนี้พบว่า ในชุดการทดลองที่มีการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนรากมากกว่าในชุดควบคุมที่ระยะเวลาเดียวกัน และจากตารางที่ 4.16 แสดงให้เห็นถึงการสะสมของแคดเมียมทั้งหมดในส่วนน้ำอ้อย พบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 6 และ 8 เดือน ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ยังพบว่าในชุดควบคุมมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.15 และ 0.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลา 6 และ 8 เดือน ตามลำดับ

ทั้งนี้ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย พบว่า ในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสาร EDTA จะมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อยน้อยกว่าในชุดที่มีการเติมสาร EDTA อาจเนื่องมาจากผลของสาร EDTA ที่ช่วยเพิ่มปริมาณการดูดซับแคดเมียมไปสะสมยังส่วนต่างๆ ของอ้อยได้มากขึ้น โดยผลการทดลองครั้งนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และ Cutright (2001) ที่ได้ทำการศึกษาผลของ EDTA ต่อการดูดซับแคดเมียม โครเมียม และนิกเกิล ด้วยต้นทานตะวัน ผลการศึกษาพบว่า EDTA มีผลทำให้ระดับความเข้มข้นของโลหะหนักในเนื้อเยื่อพืชเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และทำให้ปริมาณการดูดซับโลหะหนักของพืชเพิ่มขึ้นด้วย โดยการเติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อกิโลกรัม สามารถเพิ่มความ

เข้มข้นของแคลเซียมจาก 34 เป็น 117 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีประสิทธิภาพการดูดตั้งโลหะหนักสูงสุดที่ 59 ไมโครกรัมต่อพีซี 1 ต้น

นอกจากนี้ ความแตกต่างของการดูดตั้งแคลเซียมขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาการเจริญเติบโตของอ้อย โดยที่ระยะเวลา 2-4 เดือน อ้อยอยู่ในช่วงการเจริญเติบโตหรือที่เรียกว่า ระยะแตกกอ มีการเกิดใบและการเจริญของลำปล้องมาก พอเข้าช่วงระยะเวลา 4 เดือน อ้อยเริ่มเข้าสู่ระยะอย่างปล้อง มีการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวปล้องอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่อายุประมาณ 3-4 เดือน (Vered and Rao, 2007) จนเมื่อระยะเวลาอ้อยอายุ 6 และ 8 เดือน ซึ่งเป็นช่วงที่อ้อยมีการเจริญเติบโตน้อยลงเริ่มมีการสะสมน้ำตาลเพิ่มขึ้น จึงทำให้การสะสมแคลเซียมของใบและชานอ้อยลดลง ซึ่งต่างจากส่วนท่อนพันธุ์เดิม และราก ที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น จนถึงระยะเวลา 6 เดือน และลดลงที่ระยะเวลา 8 เดือน ซึ่งอาจเป็นเพราะอัตราการเจริญเติบโตของอ้อยเริ่มช้าลง ท่อนพันธุ์เริ่มหมดสภาพ การดูดตั้งธาตุอาหารทางรากย่อมลดลงด้วย โดยอ้อยมีการสร้างน้ำตาลที่ได้จากการสังเคราะห์แสงทางใบมาสะสมในลำต้นเท่านั้น ทำให้มีการดูดตั้งแคลเซียมได้น้อยลงด้วย ส่วนในน้ำอ้อยนั้น มีแนวโน้มของการสะสมแคลเซียมเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ซึ่งที่ระยะเวลา 8 เดือนนั้น อ้อยมีการสร้างน้ำตาลเพิ่มมากขึ้นจากที่ระยะเวลา 6 เดือน ซึ่งเป็นระยะที่เริ่มสร้างน้ำตาล (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2540)

ตารางที่ 4.12 ปริมาณแคลเซียมทั้งหมดในส่วนใบอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคลเซียมทั้งหมดในส่วนใบอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
0	4.83 ^a ±0.21	7.21 ^a ±1.75	6.30 ^a ±0.92	4.18 ^a ±1.46
0.5	6.07 ^{ab} ±1.00	8.24 ^a ±0.44	7.92 ^b ±0.48	5.74 ^{ab} ±1.56
1	7.28 ^b ±1.05	12.45 ^b ±0.33	10.81 ^c ±0.58	7.31 ^b ±0.78
2	7.12 ^b ±0.75	11.16 ^b ±0.69	8.67 ^b ±0.25	6.64 ^b ±0.45

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกรายการที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.13 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนชานอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนชานอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
0	4.95 ^a ±1.36	9.71 ^a ±1.45	8.14 ^a ±1.67	7.42 ^a ±1.30
0.5	6.12 ^{ab} ±1.19	10.40 ^a ±0.88	9.37 ^{ab} ±0.83	8.24 ^a ±0.80
1	7.80 ^b ±1.49	14.13 ^b ±0.32	11.76 ^c ±1.32	11.00 ^b ±0.82
2	8.12 ^b ±1.28	12.75 ^b ±0.75	10.77 ^{bc} ±0.66	10.56 ^b ±0.98

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.14 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนท่อนพันธุ์เดิม ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนท่อนพันธุ์เดิม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
0	7.83±1.10	8.22±4.60	11.07±3.36	7.04±1.24
0.5	8.97±0.79	10.96±2.13	11.59±3.29	7.68±2.54
1	11.78±1.80	12.26±1.10	16.76±2.69	9.36±3.96
2	9.45±2.80	11.66±2.90	15.76±1.43	8.72±1.35

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.15 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนราก ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนราก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
0	19.32±0.89	41.76±6.35	49.09±3.86	36.57±5.58
0.5	19.93±5.22	42.19±3.66	50.65±5.87	38.93±2.15
1	21.87±1.83	44.68±4.90	57.52±6.63	41.97±3.14
2	22.27±3.14	43.26±1.42	55.27±5.61	40.64±4.63

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.16 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนน้ำอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนน้ำอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
0	-	-	0.15±0.06	0.18±0.09
0.5	-	-	0.15±0.03	0.20±0.05
1	-	-	0.16±0.05	0.23±0.11
2	-	-	0.16±0.03	0.23±0.08

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

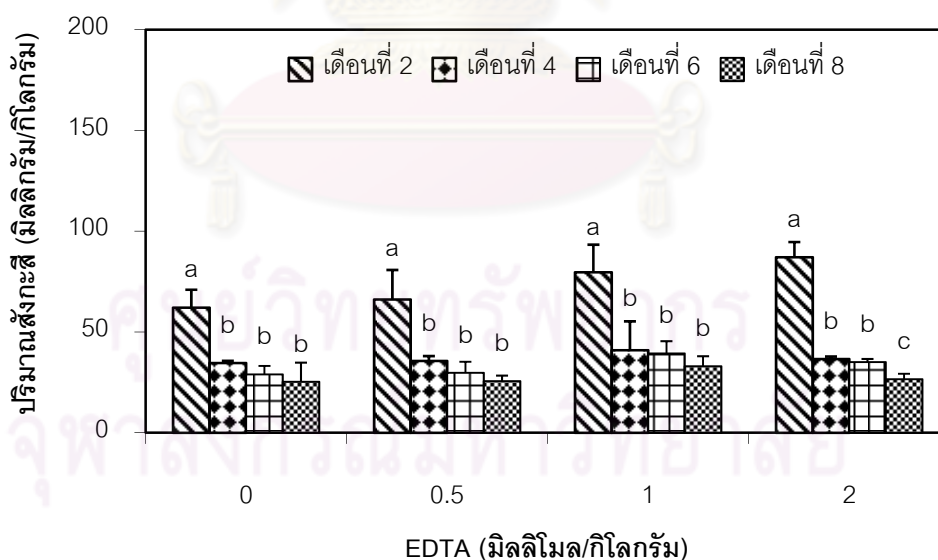
- หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์เนื่องจากไม่มีน้ำอ้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.2 ผลของสาร EDTA ต่อการสะสมสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย

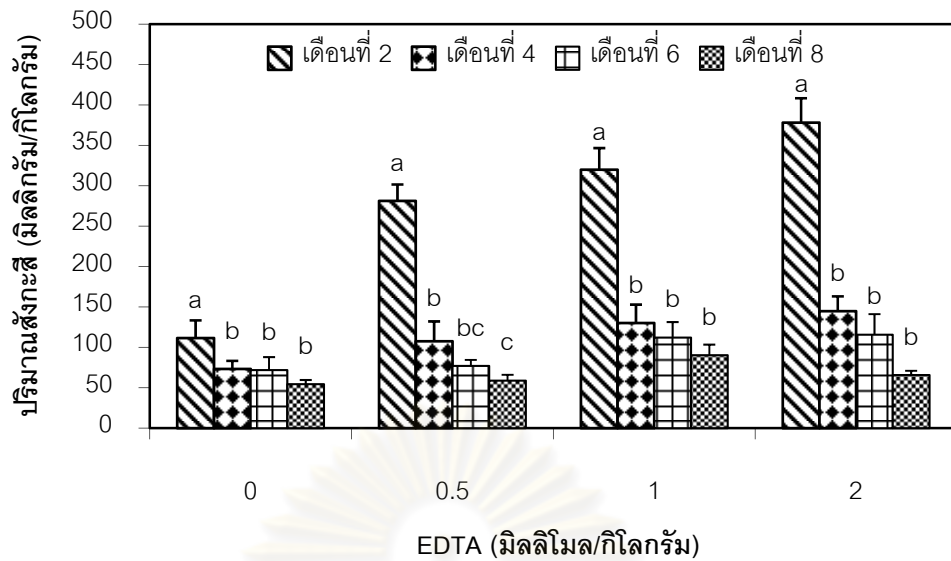
จากรูปที่ 4.12 พบว่า ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนใบ ที่ระยะเวลา 2 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ทำให้ใบมีการสะสมสังกะสีมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 62.11, 66.20, 79.66 และ 87.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) โดยปริมาณการสะสมสังกะสีในใบน้อยที่สุด ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 8 เดือนของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าเท่ากับ 25.35, 25.67, 33.04 และ 26.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA ที่ความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 2 เดือน มีปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนใบมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 87.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับในส่วนชานอ้อย พบว่า ที่ระยะเวลา 2 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ชานอ้อยมีการสะสมสังกะสีมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 111.58, 281.30, 320.00 และ 378.16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งค่าที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) เมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยปริมาณการสะสมสังกะสีในชานอ้อยน้อยที่สุด ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 8 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าเท่ากับ 54.48, 58.97, 90.36 และ 65.90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA ที่ความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 2 เดือน มีปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนชานอ้อยมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 378.16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ใบและชานอ้อยของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มของการสะสมสังกะสีลดลง เมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ในส่วนท่อนพันธุ์เดิม ดังรูปที่ 4.14 พบว่า ที่ระยะเวลา 4 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ท่อนพันธุ์เดิมมีการสะสมสังกะสีมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 114.40, 116.06, 125.00 และ 151.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) และพบว่าที่ระยะเวลา 8 เดือน มีปริมาณการสะสมสังกะสีในท่อนพันธุ์เดมน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 58.45, 68.30, 68.59 และ 69.95 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ สำหรับในส่วนราก พบว่า ที่ระยะเวลา 8 เดือนมีปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนรากมีค่าน้อยที่สุดของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าเท่ากับ 399.19, 444.34, 481.90 และ 538.33

มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15 ส่วนที่ระยะเวลา 4 เดือน รากมีการสะสมสังกะสีมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 1,003.62, 1,069.34, 1,165.75 และ 1,169.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ทั้งนี้ ชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA ที่ความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 4 เดือน มีปริมาณการดูดซับสังกะสีในส่วนรากมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 1,169.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ท่อนพันธุ์เดิมและรากมีแนวโน้มของการสะสมสังกะสีลดลงที่ระยะเวลา 6 และ 8 เดือน สำหรับปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนน้ำอ้อย สามารถทำการศึกษาได้ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 6 และ 8 เดือน ทั้งนี้ในช่วงระยะเวลาที่ 2 และ 4 เดือน ต้นอ้อยยังไม่มีการสร้างน้ำตาล จึงทำให้ไม่มีผลของน้ำอ้อยที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างดังกล่าว ซึ่งจากผลการศึกษาปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนน้ำอ้อยพบว่า ที่ระยะเวลา 8 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน น้ำอ้อยมีการสะสมสังกะสีมากกว่าที่ระยะเวลา 6 เดือน โดยมีค่าเท่ากับ 12.09, 12.47, 12.60 และ 12.88 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (คำนวณจากความหนาแน่นของน้ำอ้อย 1.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, ภาคผนวก ก) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนน้ำอ้อยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาการศึกษาเพิ่มมากขึ้น และไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังรูปที่ 4.16

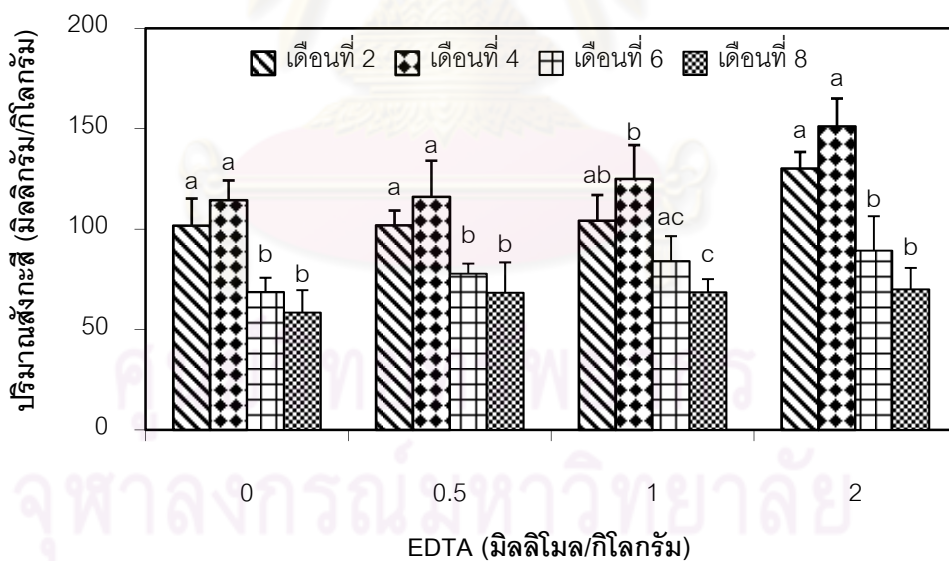


รูปที่ 4.12 ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนใบที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

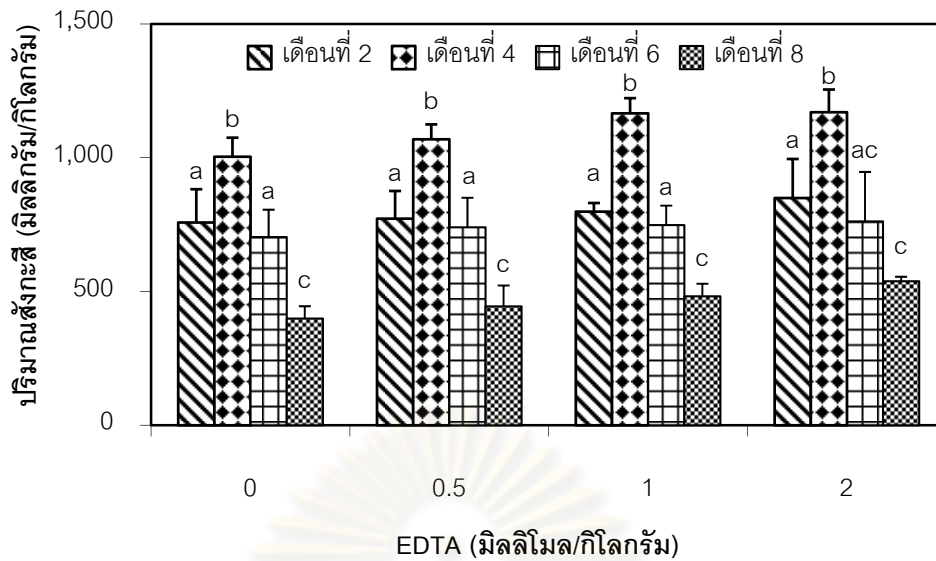
หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT



รูปที่ 4.13 ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วน잔อ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)
 หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT

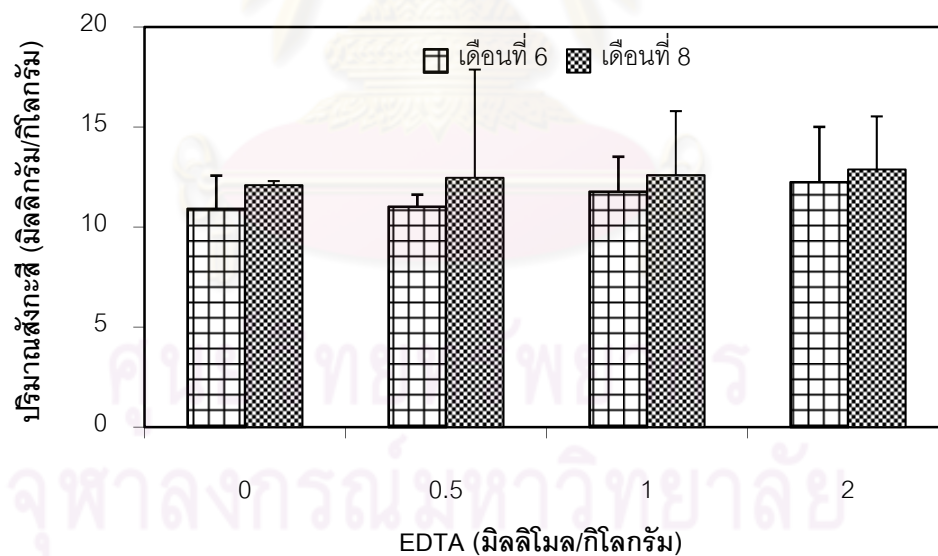


รูปที่ 4.14 ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนท่อนพันธุ์เดิมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)
 หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT



รูปที่ 4.15 ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนรากที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT



รูปที่ 4.16 ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนน้ำอ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT

จากตารางที่ 4.17 - 4.21 แสดงปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA โดยพบว่า ปริมาณการสะสมสังกะสีทั้งหมดในส่วนใบอ้อยของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.17) ทั้งนี้ที่ระยะเวลา 2 และ 6 เดือน พบว่า ชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสาร EDTA มีปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนใบอ้อยน้อยกว่าในชุดการทดลองที่มีการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) และที่ระยะเวลา 2 เดือน ในชุดการทดลองที่เติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีส่วนช่วยในการดูดดึงสังกะสีในใบมากที่สุด เท่ากับ 87.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รองลงมาคือชุดการทดลองที่เติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1, 0.5 และ 0 (ควบคุม) มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยมีค่าเท่ากับ 79.66, 66.20 และ 62.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนปริมาณการสะสมสังกะสีทั้งหมดในส่วนชานอ้อยของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.18) โดยพบว่า ชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสาร EDTA มีปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนชานอ้อยน้อยกว่าในชุดการทดลองที่มีการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) นอกจากนี้ที่ระยะเวลา 2 เดือน ในชุดการทดลองที่เติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีส่วนช่วยในการดูดดึงสังกะสีในชานอ้อยมากที่สุด เท่ากับ 378.16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1, 0.5 และ 0 (ควบคุม) มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยมีค่าเท่ากับ 320.00, 281.30 และ 111.58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนท่อนพันธุ์เดิม (ตารางที่ 4.19) พบว่า มีปริมาณการสะสมสังกะสีในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 2 และ 4 เดือน มีค่าเท่ากับ 130.21 และ 151.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณการสะสมสังกะสีมากกว่า และมีความแตกต่างจากชุดการทดลองอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) จากตารางที่ 4.20 พบว่า ที่ระยะเวลา 4 และ 8 เดือน มีปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนรากของชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสาร EDTA น้อยกว่าในชุดการทดลองที่มีการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ที่ระยะเวลา 4 เดือน โดยในชุดการทดลองที่เติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีส่วนช่วยในการดูดดึงสังกะสีในรากมากที่สุด รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1, 0.5 และ 0 (ควบคุม) มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับ 1,169.98, 1,165.75, 1,069.34 และ 1,003.62 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนน้ำอ้อย (ตารางที่ 4.21) พบว่า ในทุกชุดการทดลองที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และ

มีแนวโน้มของการสะสมสังกะสีเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลา 8 เดือน ในชุดการทดลองที่เติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีส่วนช่วยในการดูดซับสังกะสีในน้ำอ้อยมากที่สุด รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1 , 0.5 และ 0 (ควบคุม) มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับ 12.88, 12.60, 12.47 และ 12.09 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

จากผลการสะสมของสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย พบว่า ในชุดควบคุมที่ไม่มี การเติมสาร EDTA มีปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อยน้อยกว่าชุดการทดลองที่มีการเติมสาร EDTA นอกจากนี้ปริมาณการดูดซับสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อยเมื่อนำไปเทียบกับปริมาณการดูดซับแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย พบว่า ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย มีมากกว่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสังกะสี เป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตต่อพืช โดยมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับฮอร์โมนพืช มีบทบาททางอ้อมในการสร้างคลอโรฟิลล์ และยังเป็นตัวปลูกฤทธิ์ของเอนไซม์หลายชนิด เช่น Carbonic, Dehydrogenase และ Peptidase (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา) จึงทำให้อ้อยสามารถดูดซับสังกะสีไปสะสมยังส่วนต่างๆ ได้มากกว่าแคดเมียม

ตารางที่ 4.17 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนใบอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนใบอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
ควบคุม	62.11 ^a ±8.89	34.67± 1.04	28.98 ^a ±4.24	25.35±9.51
0.5	66.20 ^{ab} ±14.63	35.65± 2.45	29.83 ^a ±5.46	25.67±2.75
1	79.66 ^{ab} ±13.73	41.00±14.32	39.39 ^b ±6.10	33.04±4.98
2	87.18 ^b ±7.49	36.65± 1.22	35.09 ^{ab} ±1.58	26.67±2.66

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวดิ่ง บอกระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.18 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนชานอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนชานอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
ควบคุม	111.58 ^a ±21.89	73.33 ^a ±10.00	71.86 ^a ±16.17	54.48 ^a ±5.23
0.5	281.30 ^b ±20.33	107.63 ^{ab} ±24.52	77.08 ^a ±7.45	58.97 ^a ±7.08
1	320.00 ^b ±26.70	130.14 ^b ±22.78	112.24 ^b ±19.10	90.36 ^b ±13.12
2	378.16 ^c ±30.28	144.78 ^b ±18.37	115.70 ^b ±25.48	65.90 ^a ±5.19
หมายเหตุ	ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%			

ตารางที่ 4.19 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนท่อนพันธุ์เดิม ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนท่อนพันธุ์เดิม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
ควบคุม	101.74 ^a ±13.48	114.40 ^a ±9.81	68.74± 1.04	58.45±11.16
0.5	101.84 ^a ± 7.41	116.06 ^a ±18.02	77.80± 5.01	68.30±15.12
1	104.18 ^a ±12.80	125.00 ^{ab} ±16.85	84.13±12.37	68.59± 6.49
2	130.21 ^b ± 8.23	151.12 ^b ±13.93	89.27±17.15	69.95±10.73
หมายเหตุ	ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%			

ตารางที่ 4.20 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนราก ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนราก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
ควบคุม	757.75±124.45	1,003.62 ^a ±71.38	703.63±102.30	399.19 ^a ±45.82
0.5	772.59±103.33	1,069.34 ^{ab} ±55.16	740.24±110.09	444.34 ^{ab} ±78.08
1	798.77± 32.21	1,165.75 ^b ±57.21	748.10±72.83	481.90 ^{ab} ±47.07
2	849.56±145.73	1,169.98 ^b ±84.98	762.15±184.77	538.33 ^b ±16.87

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.21 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนน้ำอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนน้ำอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
ควบคุม	-	-	10.91±1.66	12.09±0.21
0.5	-	-	11.02±0.60	12.47±5.40
1	-	-	11.77±1.75	12.60±3.20
2	-	-	12.24±2.77	12.88±2.65

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

- หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์เนื่องจากไม่มีน้ำอ้อย

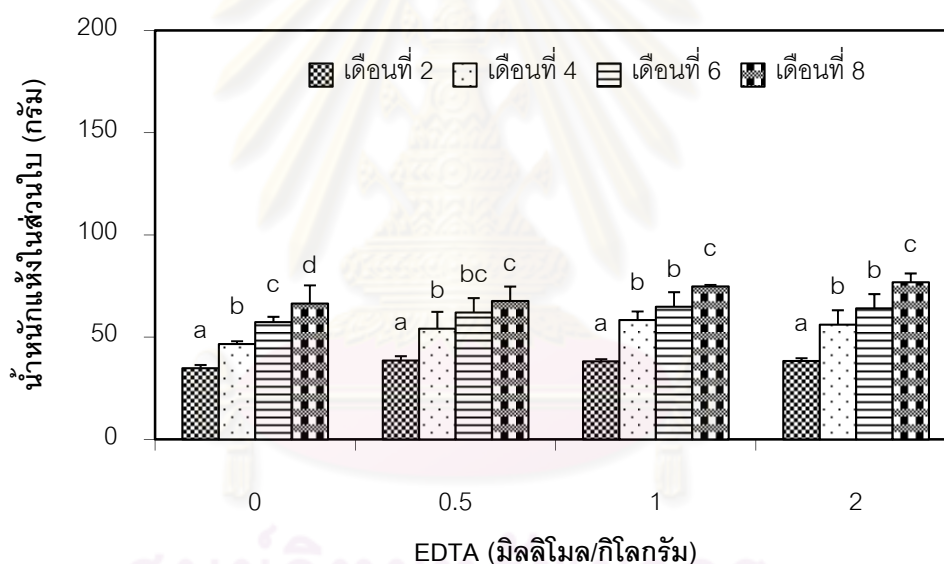
4.5 ผลของสาร EDTA ต่อการแสดงความเป็นพิษ และการเจริญเติบโตของอ้อย

การศึกษานี้ นอกจากทำการศึกษาผลของสาร EDTA ต่อการดูดตั้งแคดเมียม และสังกะสีแล้ว ยังทำการศึกษาการเจริญเติบโตของอ้อย โดยพิจารณาจากน้ำหนักแห้งของพืช ความสูงของพืชทั้งในส่วนลำต้น และส่วนราก รวมถึงการสังเกตความเป็นพิษจากการแสดงอาการของอ้อย ที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 2, 4, 6 และ 8 เดือน ซึ่งผลของสาร EDTA ต่อการแสดงความเป็นพิษต่ออ้อย พบว่า อ้อยไม่มีการแสดงถึงความเป็นพิษใดๆ ตลอดระยะเวลาการเก็บเกี่ยว ส่วนผลของสาร EDTA ต่อการเจริญเติบโตของอ้อยสามารถแสดงได้ดังนี้

4.5.1 ผลของสาร EDTA ต่อการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนต่างๆ ของอ้อย

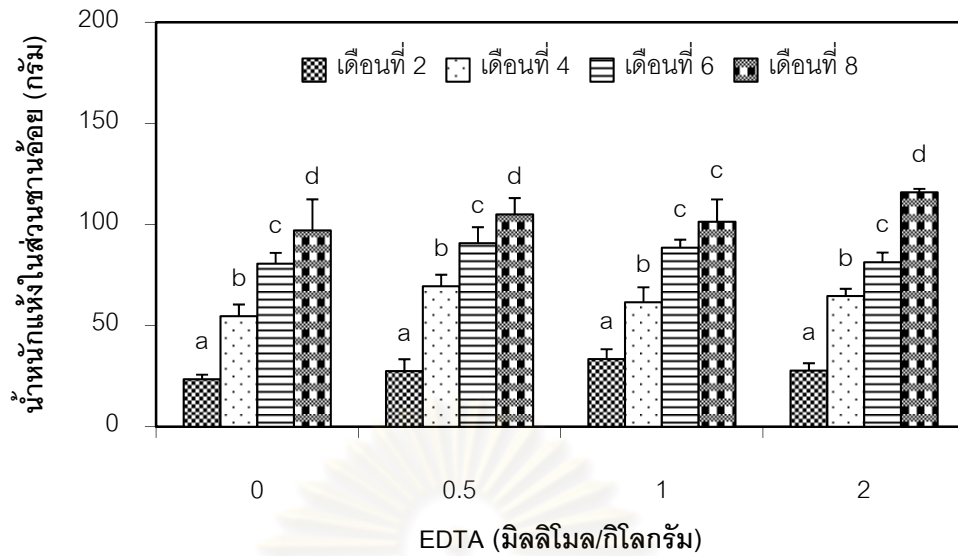
เมื่ออ้อยที่ปลูกลงในดินทดลองมีอายุครบ 1 เดือน ทำการใส่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างอ้อยที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน โดยนำตัวอย่างอ้อยมาล้างน้ำให้สะอาดด้วยน้ำประปา 3-4 ครั้ง และล้างด้วยน้ำกลั่น 1 ครั้ง ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นแบ่งอ้อยออกเป็น 4 ส่วน คือ ราก ท่อนพันธุ์เดิม ชานอ้อย และใบ และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 – 48 ชั่วโมง และนำไปชั่งน้ำหนักแห้งในแต่ละส่วนของอ้อย ซึ่งผลการทดลอง พบว่า ใบ และชานอ้อยมีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน ในทุกระดับความเข้มข้นของสาร EDTA โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ทั้งนี้ น้ำหนักแห้งในส่วนใบมีค่าอยู่ในช่วง 34.83-76.86 กรัม และพบว่า ที่ระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว 8 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าน้ำหนักแห้งในส่วนใบมากที่สุด เท่ากับ 66.47, 67.70, 74.87 และ 76.86 กรัม ตามลำดับ โดยค่าน้ำหนักแห้งที่มากที่สุดอยู่ในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าเท่ากับ 76.86 กรัม สำหรับชานอ้อย พบว่า น้ำหนักแห้งในส่วนชานอ้อยมีค่าอยู่ในช่วง 23.52-115.97 กรัม และพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 8 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าน้ำหนักแห้งในส่วนชานอ้อยมากที่สุด เท่ากับ 97.15, 105.01, 101.39 และ 115.97 กรัม ตามลำดับ โดยค่าน้ำหนักแห้งที่มากที่สุด อยู่ในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าเท่ากับ 115.97 กรัม สำหรับน้ำหนักแห้งในส่วนท่อนพันธุ์เดิม ดังรูปที่ 4.19 พบว่า ท่อนพันธุ์เดิมของอ้อยมีน้ำหนักแห้งลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น ในทุกระดับความเข้มข้นของสาร EDTA โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ทั้งนี้ น้ำหนักแห้งในส่วนท่อนพันธุ์เดิมมีค่าอยู่ในช่วง 19.73-35.27 กรัม และพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 2 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าน้ำหนักแห้งในส่วนท่อนพันธุ์เดิมมากที่สุด เท่ากับ 26.44, 35.27, 28.69 และ 31.61 กรัม ตามลำดับ โดยค่าน้ำหนักแห้งที่มากที่สุด อยู่ในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA 0.5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าเท่ากับ 35.27 กรัม สำหรับรากอ้อย พบว่า มีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน ในทุกระดับความเข้มข้นของสาร EDTA โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ดังรูปที่ 4.20 ทั้งนี้ น้ำหนักแห้งในส่วนรากมีค่าอยู่ในช่วง 13.03-42.78 กรัม และพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว 8 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าน้ำหนักแห้ง

ในส่วนรวมมากที่สุด เท่ากับ 30.91, 36.52, 36.99 และ 42.78 กรัม ตามลำดับ โดยค่าน้ำหนักแห้งที่มากที่สุด อยู่ในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าเท่ากับ 42.78 กรัม และการศึกษาการเจริญเติบโตด้านปริมาณของน้ำอ้อย สามารถวัดปริมาณของน้ำอ้อยได้ในเดือนที่ 6 และ 8 เนื่องจากช่วง 4 เดือนแรกอ้อยยังไม่มีการสร้างน้ำตาล ดังรูปที่ 4.21 พบว่าน้ำอ้อยมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 6 และ 8 เดือน ในทุกระดับความเข้มข้นของสาร EDTA โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ทั้งนี้ปริมาณน้ำอ้อยมีค่าอยู่ในช่วง 45-179 มิลลิลิตร และพบว่าที่ระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว 8 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีค่าปริมาณน้ำอ้อยมากที่สุด เท่ากับ 76, 145, 155 และ 179 มิลลิลิตร ตามลำดับ โดยปริมาณน้ำอ้อยที่มากที่สุด อยู่ในชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA 2 มิลลิโมล มีค่าเท่ากับ 179 มิลลิลิตร



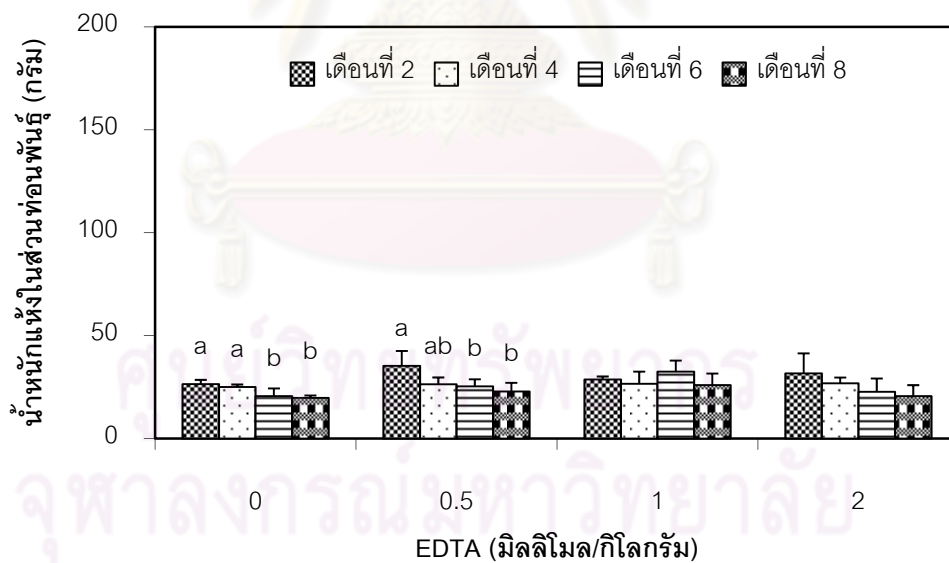
รูปที่ 4.17 น้ำหนักแห้งในส่วนใบที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT



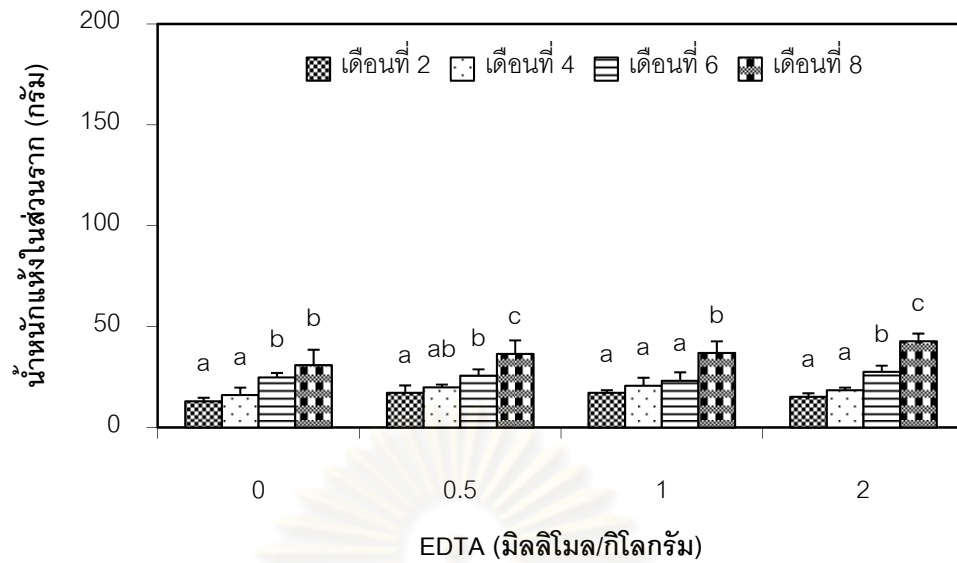
รูปที่ 4.18 น้ำหนักแห้งในส่วนซันอ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT



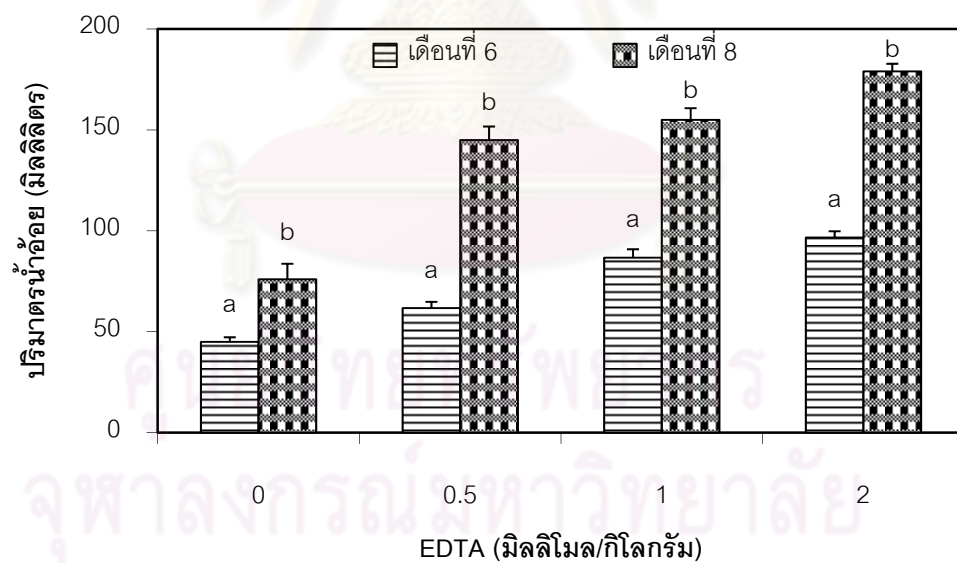
รูปที่ 4.19 น้ำหนักแห้งในส่วนท่อนพันธุ์เดิมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT



รูปที่ 4.20 น้ำหนักแห้งในส่วนรุมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT



รูปที่ 4.21 ปริมาณในส่วนน้ำอ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT

จากตารางที่ 4.22-4.26 แสดงผลของการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนต่างๆ ของอ้อย เมื่อเทียบตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA พบว่า น้ำหนักแห้งในส่วนของใบ ชานอ้อย ราก และปริมาตรของน้ำอ้อย มีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 2 ถึง 8 เดือน โดยน้ำหนักแห้งในส่วนใบ และชานอ้อย ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 2 และ 4 เดือน ของชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโกรัมดิน มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสาร EDTA โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ในส่วนราก พบว่า ในทุกชุดการทดลอง มีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น และไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับปริมาตรน้ำอ้อย พบว่า ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 6 และ 8 เดือน ของชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโกรัมดิน มีปริมาตรมากกว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสาร EDTA โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) และในส่วนท่อนพันธุ์เดิม พบว่า ในทุกชุดการทดลอง มีน้ำหนักแห้งลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น และไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากผลการศึกษาการเจริญเติบโตของอ้อยด้านน้ำหนักแห้ง ในส่วนต่างๆ ของอ้อย ได้แก่ ใบ ชานอ้อย ท่อนพันธุ์เดิม ราก และน้ำอ้อยนั้น พบว่า การเติมสาร EDTA ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของอ้อย ซึ่งพืชไม่แสดงอาการใดๆ และน้ำหนักแห้งโดยรวมของอ้อยไม่มีความแตกต่างกันมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ใส่สาร EDTA โดยพืชที่มีการเติมสาร EDTA จะมีน้ำหนักแห้งโดยรวมมากกว่าชุดควบคุมเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Evangelou *et al.* (2006) ที่ทำการศึกษาศามารถของสารคีเลต 2 ชนิด คือ EDTA และ EDDS ที่ระดับความเข้มข้น 1.5, 3.25, 6.25, 12.5, 25 และ 50 มิลลิโมลต่อกิโกรัมดิน ต่อการดูด ดึงแคลเซียม และทองแดงออกจากดินที่ปนเปื้อนโดยใช้ต้นยาสูบ (*Nicotiana tabacom*) และ ศึกษาการแสดงความเป็นพิษของสารคีเลตต่อต้นยาสูบ ผลการศึกษา พบว่า สาร EDTA ไม่มีผล ต่อการแสดงความเป็นพิษต่อพืช ในขณะที่ German *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาผลของการเติม สารคีเลต 2 ชนิด คือ สาร EDTA และ EDDS ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 3, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโกรัมดิน ต่อการดูดดึงแคลเซียม สังกะสี และตะกั่ว ด้วยการปลูกผักกาดเขียวปลี ผลการ ทดลอง พบว่า สาร EDTA ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของผักกาดเขียวปลี ที่ ระดับความเข้มข้น 3 และ 5 มิลลิโมลต่อกิโกรัมดิน ในขณะที่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อกิโกรัมดิน มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักกาดเขียวปลี

ตารางที่ 4.22 น้ำหนักแห้งในส่วนใบอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	น้ำหนักแห้งในส่วนใบอ้อย (กรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
ควบคุม	34.83 ^a ±1.55	46.69 ^a ±1.33	57.36±2.59	66.47±8.89
0.5	38.61 ^b ±2.07	54.15 ^{ab} ±8.23	62.10±7.00	67.70±7.07
1	38.21 ^b ±1.06	58.43 ^b ±4.14	64.89±7.13	74.87±0.70
2	38.40 ^b ±1.32	56.16 ^{ab} ±7.02	64.15±6.94	76.86±4.32

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.23 น้ำหนักแห้งในส่วนในส่วนของส่วนอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	น้ำหนักแห้งในส่วนในส่วนของส่วนอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
ควบคุม	23.52 ^a ±2.26	54.68 ^a ±5.78	80.68±5.33	97.15±15.32
0.5	27.58 ^{ab} ±5.83	69.52 ^b ±5.70	90.79±7.92	105.01± 8.08
1	33.50 ^b ±4.84	61.62 ^{ab} ±7.37	88.60±3.94	101.39±11.04
2	27.80 ^{ab} ±3.63	64.68 ^{ab} ±3.55	81.38±4.78	115.97± 1.68

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.24 น้ำหนักแห้งในส่วนท่อนพันธุ์เดิม ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	น้ำหนักแห้งในส่วนท่อนพันธุ์เดิม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
ควบคุม	26.44±2.06	25.04±1.18	20.61±3.73	19.73±1.16
0.5	35.27±7.24	26.36±3.29	25.37±3.38	22.83±4.23
1	28.69±1.42	26.55±5.94	32.45±5.40	25.92±5.61
2	31.61±9.73	26.82±2.78	22.70±6.42	20.58±5.35

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวดิ่ง บอกระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.25 น้ำหนักแห้งในส่วนราก ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	น้ำหนักแห้งในส่วนราก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
ควบคุม	13.03±1.73	16.08±3.72	24.82±2.22	30.91±7.66
0.5	17.21±3.67	19.96±1.35	25.71±3.14	36.52±6.67
1	17.24±1.25	3.93±20.74	23.20±4.17	36.99±5.75
2	15.25±1.74	18.51±1.28	27.59±3.09	42.78±3.80

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวดิ่ง บอกระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.26 ปริมาตรในส่วนน้ำอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ปริมาตรในส่วนน้ำอ้อย (มิลลิลิตร)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
ควบคุม	-	-	45.00 ^a ±5.00	76.00 ^a ±3.61
0.5	-	-	61.67 ^b ±5.77	145.00 ^b ±8.66
1	-	-	86.67 ^c ±2.89	155.00 ^b ±5.00
2	-	-	96.67 ^d ±5.77	179.00 ^c ±5.29

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวดิ่ง บอกระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
- หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์เนื่องจากไม่มีน้ำอ้อย

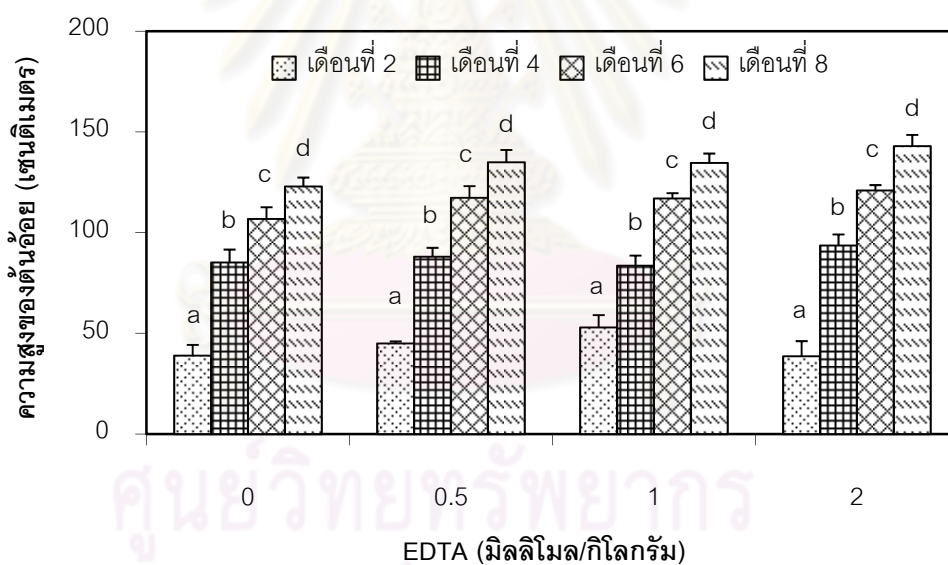
4.5.2 ผลของสาร EDTA ต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงของลำต้น และความยาวรากของอ้อย

การศึกษาผลของสาร EDTA ต่อการเจริญเติบโตของอ้อย นอกจากจะทำการศึกษาจากผลด้านน้ำหนักแห้งในส่วนต่างๆ ของอ้อยแล้ว ยังได้มีการศึกษาการเจริญเติบโตด้านความสูงของลำต้น และความยาวรากของอ้อยหลังจากทำการเก็บตัวอย่างอ้อยที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน โดยผลการศึกษาแสดงได้ดังนี้

1) การเจริญเติบโตด้านความสูงของลำต้น

การเจริญเติบโตด้านความสูงของลำต้นอ้อย ดังรูปที่ 4.22 พบว่า ต้นอ้อยมีความสูงเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน ในทุกระดับความเข้มข้นของสาร EDTA และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) โดยที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 2 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ต้นอ้อยมีความสูงน้อยที่สุด เท่ากับ 39, 45, 53 และ 38.67 เซนติเมตร ตามลำดับ และต้นอ้อยมีความสูงมากที่สุด ที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 8 เดือน โดยมีค่าเท่ากับ 123, 135, 134.67 และ 143 เซนติเมตร ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ และจากตารางที่ 4.27 เมื่อทำการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตด้านความสูงของลำต้น ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA พบว่า ที่

ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 2, 6 และ 8 เดือนของชุดการทดลองที่มีการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีความสูงของลำต้นมากกว่าในชุดควบคุมที่ไม่มีสาร EDTA โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมสาร EDTA ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของด้านความสูงของอ้อย ประกอบกับอ้อยเป็นพืชที่มีความทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดี จึงทำให้การเจริญเติบโตเป็นปกติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liphadzi และ Kirkham (2006) ได้ทำการศึกษาผลของสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0, 1, 2 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ในการดูดตั้งโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสีที่ปนเปื้อนในดิน ด้วยต้นทานตะวัน (*Helianthus annuus*) และทำการศึกษาความเป็นพิษของสารเคเลต โดยศึกษาจากความสูงของพืช (Plant Height) หลังจากทำการปลูกพืช และใส่สาร EDTA ที่ระยะเวลา 54, 58, 61, 64 วัน ผลการศึกษาพบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น พืชมีความสูงเพิ่มขึ้น และสาร EDTA ที่ทุกระดับความเข้มข้น ไม่มีผลต่อความสูงของพืช โดยความสูงของพืชอยู่ในช่วง 75-95 เซนติเมตร



รูปที่ 4.22 ความสูงของลำต้นอ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT

ตารางที่ 4.27 การเจริญเติบโตด้านความสูงของลำต้น ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

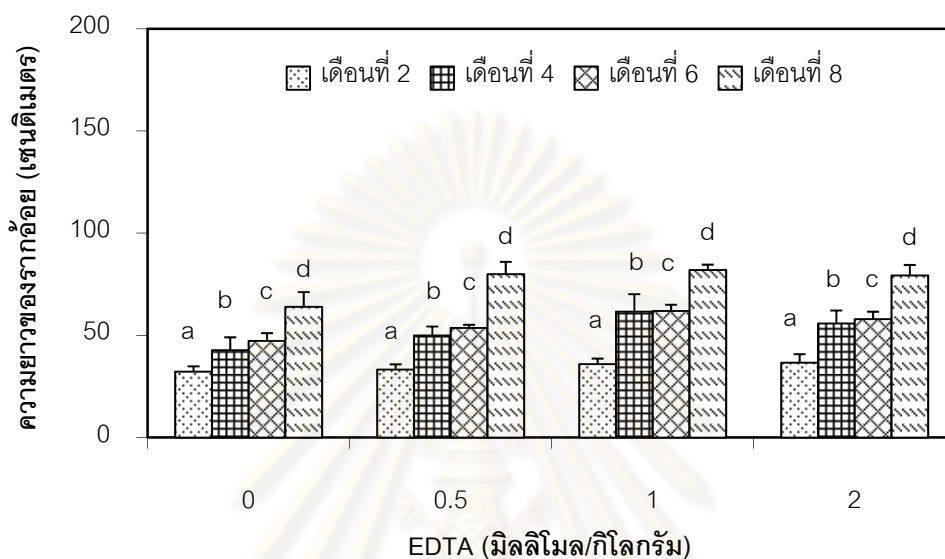
ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ความสูงของลำต้นอ้อย (เซนติเมตร)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
ควบคุม	39.00 ^a ±5.29	85.23±6.38	106.83 ^a ±5.80	123.00 ^a ±4.36
0.5	45.00 ^{ab} ±1.00	88.07±4.43	117.33 ^{ab} ±5.80	135.00 ^b ±6.08
1	53.00 ^b ±6.08	83.67±4.96	117.00 ^b ±2.65	134.67 ^c ±4.62
2	38.67 ^a ±0.75	93.63±5.48	121.00 ^a ±2.65	143.00 ^b ±5.57

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวนอน บอกรวมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2) การเจริญเติบโตด้านความยาวราก

จากรูปที่ 4.23 แสดงผลการศึกษากการเจริญเติบโตด้านความยาวรากของอ้อย โดยพบว่า อ้อยมีความยาวรากเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) โดยที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 2 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน อ้อยมีความยาวรากน้อยที่สุด เท่ากับ 32.33, 33.33, 36.00 และ 36.67 เซนติเมตร ตามลำดับ และที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 8 เดือน ของชุดการทดลองที่มีการเติม EDTA ในดินที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน อ้อยมีความยาวรากมากที่สุด เท่ากับ 64, 80, 82 และ 79.33 เซนติเมตร ตามลำดับ และจากตารางที่ 4.28 พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตด้านความยาวของรากอ้อย ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA พบว่า ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือนของชุดการทดลองที่มีการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีความยาวรากมากกว่าในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสาร EDTA โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ซึ่งจากผลการศึกษาด้านการเจริญเติบโตด้านความยาวรากของอ้อย พบว่า การเติมสาร EDTA ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตด้านความยาวรากของอ้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cui et al. (2006) ได้ทำการศึกษาผลของสารคีเลต 4 ชนิด ได้แก่ Na_2EDTA , Tartaric Acid, Oxalic Acid และ Citric Acid ที่ระดับความเข้มข้น 1.2, 2.4 และ 4.8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน เพื่อช่วยดูดดึงตะกั่วด้วยต้นบานชื่น (*Zinnia elegans* Jacq.) และทำการศึกษาคือความเป็นพิษของสารคีเลต โดยศึกษาจากความสูงของลำต้น และความยาวราก พบว่า สาร EDTA ที่ทุกระดับความเข้มข้นไม่ส่งผลต่อการ

เจริญเติบโตด้านความสูงของลำต้นในส่วเหนือดินของพืช (Shoot Length) และสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1.2 และ 2.4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ไม่ส่งผลต่อความยาวรากของพืช แต่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 4.8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีผลทำให้ความยาวรากของพืช (Root Length) ลดลง



รูปที่ 4.23 ความยาวของรากอ้อยที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT

ตารางที่ 4.28 การเจริญเติบโตด้านความยาวราก ตามระดับความเข้มข้นของสาร EDTA (n=3)

ระดับความเข้มข้น ของสาร EDTA (มิลลิโมลต่อกิโลกรัม)	ความยาวของรากอ้อย (เซนติเมตร)			
	2 เดือน	4 เดือน	6 เดือน	8 เดือน
ควบคุม	32.33 ^a ±2.52	42.80 ^a ±6.29	47.33 ^a ±3.79	64.00 ^a ±7.21
0.5	33.33 ^{ab} ±2.52	50.00 ^{ab} ±4.36	53.67 ^b ±1.53	80.00 ^b ±6.00
1	36.00 ^b ±2.65	61.67 ^b ±8.50	62.00 ^c ±3.00	82.00 ^b ±2.65
2	36.67 ^a ±4.16	55.83 ^b ±6.37	58.00 ^{bc} ±3.61	79.33 ^b ±5.13

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแนวตั้ง บอกความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.6 การเปรียบเทียบผลของสาร EDTA ต่อความสามารถในการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย

งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาผลของสาร EDTA ต่อความสามารถในการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย 5 ส่วน คือ ใบ ชานอ้อย ท่อนพันธุ์เดิม ราก และน้ำอ้อย เพื่อนำมาเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียม และสังกะสีของแต่ละส่วน โดยนำค่าการดูดดึงแคดเมียม และสังกะสี (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) มาเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถแสดงผลการศึกษาได้ดังนี้

4.6.1 การเปรียบเทียบผลของสาร EDTA ต่อความสามารถในการสะสมแคดเมียมไว้ในส่วนต่างๆ ของอ้อย

ภายหลังจากทำการศึกษารอบทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง ได้แสดงถึงความสามารถของสาร EDTA ในการดูดดึงแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดิน พบว่า แคดเมียมในดินมีปริมาณลดลงเมื่อระยะเวลาการศึกษาเพิ่มขึ้น หรือเมื่ออายุของอ้อยเพิ่มขึ้นจนถึงที่ระยะเวลา 6 เดือน และลดลงที่ระยะเวลา 8 เดือน ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย ดังรูปที่ 4.24 พบว่า รากอ้อยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุด และการใส่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 6 เดือน สามารถเพิ่มการดูดดึงแคดเมียมมากที่สุด ทั้งนี้รากอ้อยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างอ้อย 6 เดือน และลดลงเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 8 เดือน อาจเนื่องมาจากในระยะเวลา 6 เดือน เป็นระยะอย่างปลั่ง (Grand Growth Phase) ของอ้อย ซึ่งระยะนี้จะมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยอ้อยได้รับน้ำ ความชื้น และธาตุอาหารในดินจากราก ซึ่งในระยะนี้เป็นช่วงที่รากชุดเดิม หรือที่เรียกว่า รากของท่อนพันธุ์ (Sett Root) ที่เจริญมาจากปุ่มรากในส่วนข้อ (Primordial Roots) ของท่อนพันธุ์เริ่มหมดสภาพทยอยตายไป และมีการทดแทนหรือแทนที่โดยรากของหน่อ (Shoot Root) ซึ่งเป็นรากที่สมบูรณ์และมีขนาดใหญ่กว่ารากของท่อนพันธุ์เดิม จึงทำให้รากของอ้อยมีการดูดดึงแคดเมียมได้มากขึ้น (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2540) หลังจากนั้น ในระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 8 เดือน พบว่า อัตราการเจริญเติบโตเริ่มช้าลง จึงทำให้การดูดดึงธาตุอาหารทางรากก็ย่อมลดลงด้วย เหลือเพียงการสร้างน้ำตาลที่ได้จากการสังเคราะห์แสงทางใบมาสะสมไว้ในลำต้นเท่านั้น ซึ่งมียปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนรากมากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่นๆ ของอ้อย โดยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศศิธร ใฝ่สังธรรม (2549) ที่ได้ทำการศึกษากการสะสมแคดเมียมของหญ้าแฝกกลุ่ม และหญ้าแฝกดอนจากดิน ซึ่งพบว่า หญ้าแฝกทั้งสองกลุ่มพันธุ์มีการสะสมแคดเมียมไว้ที่ส่วนรากมากกว่าส่วนใบ และลำต้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Segura และคณะ (2006) ที่ได้

ทำการศึกษาระยะสมโลหะในอ้อยที่ปลูกในดินบริเวณที่มีการฝังกลบขยะชุมชน พบว่า อ้อยสามารถสะสมแคดเมียมไว้ที่รากมากกว่าลำต้น และใบ โดยมีค่าเท่ากับ 0.23, 0.20 และ 0.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

สำหรับการสะสมแคดเมียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิม พบว่า ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิมมีปริมาณการสะสมแคดเมียมรองลงมาจากรากอ้อย โดยมีแนวโน้มของการสะสมเพิ่มมากขึ้นจนถึงระยะเวลา 6 เดือน และลดลงที่ระยะเวลา 8 เดือนเช่นเดียวกับรากอ้อย ทั้งนี้เนื่องจากในระยะแรกของการปลูก หรือที่เรียกว่า ระยะงอก (Germination Phase) ซึ่งเป็นระยะตั้งแต่การปลูกจนกระทั่งหน่อโผล่พื้นดิน รากของท่อนพันธุ์ได้ทำหน้าที่ในการดูดน้ำ และธาตุอาหารให้อ้อยมีการเจริญเติบโตขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปรากของหน่อได้เกิดขึ้นมาแทน หลังจากนั้น รากของท่อนพันธุ์ รวมถึงตัวท่อนพันธุ์จึงหมดสภาพลงในระหว่างการปลูกประมาณ 6 เดือน ทั้งนี้ชุดการทดลองที่มีการใส่สาร EDTA มีผลทำให้การสะสมแคดเมียมเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสาร EDTA ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ วราภรณ์ ศรีตัมภวา (2550) ได้ทำการศึกษาระยะดูดดึงแคดเมียมโดยอ้อย ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมทั้งในพื้นที่จริง และเรือนทดลอง พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนท่อนพันธุ์เดิมของอ้อยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 6 เดือน และลดลงที่ระยะเวลา 9 เดือน และเนื่องจากการทดลองครั้งนี้ต้องการศึกษาผลของสารคีเลตต่อการช่วยดูดดึงโลหะหนักอย่างแท้จริง จึงไม่มีการใส่ปุ๋ยซึ่งอาจมีผลให้อ้อยดูดดึงแคดเมียมได้แตกต่างกันออกไป เช่น งานวิจัยของ สุวิชีรา เรืองขำ (2550) ที่ได้ทำการศึกษารวมของปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อการดูดดึงแคดเมียม และสังกะสีของอ้อย พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เพิ่มสูงขึ้นจากการเติมปุ๋ยมีผลทำให้แคดเมียม และสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดดึงได้มีค่าลดลง รวมถึงการสะสมของแคดเมียม และสังกะสีในอ้อยก็ลดลงเช่นกัน

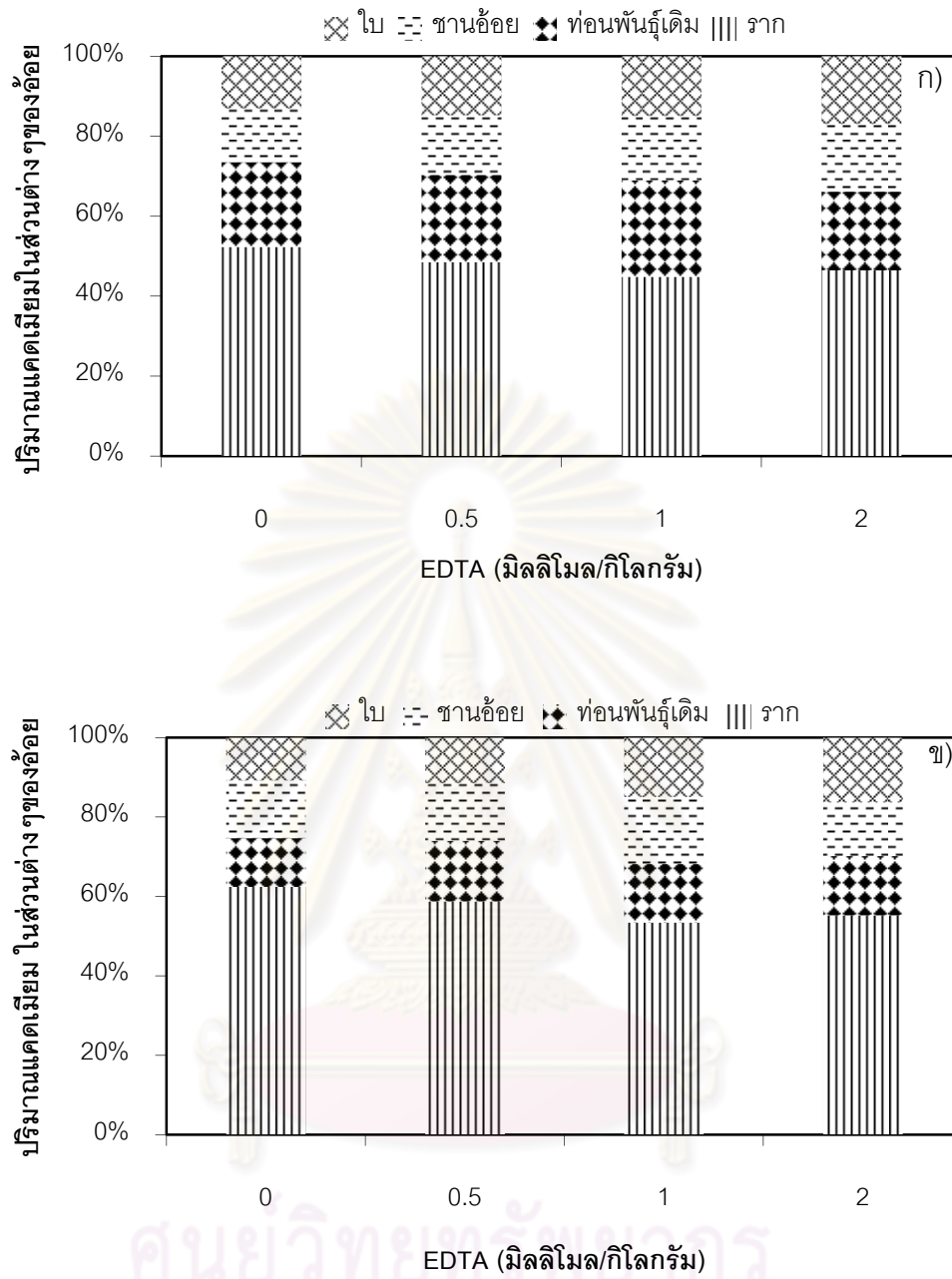
การสะสมแคดเมียมในส่วนชานอ้อย และใบ พบว่า มีปริมาณการดูดดึงแคดเมียมรองลงมาจากรากอ้อย และท่อนพันธุ์เดิม ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มของการสะสมแคดเมียมเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะเวลา 4 เดือน และลดลงที่ระยะเวลา 6 และ 8 เดือน โดยที่ระยะเวลาการเก็บเกี่ยวอ้อย 2-4 เดือน อ้อยอยู่ในช่วงการเจริญเติบโตที่เรียกว่า ระยะแตกกอ มีการเกิดใบและการเจริญของลำปล้องมาก พอเข้าสู่ช่วงระยะเวลาการเก็บเกี่ยวอ้อย 4 เดือน อ้อยเริ่มเข้าสู่ระยะย่างปล้องมีการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวปล้องอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่อายุประมาณ 3-4 เดือน (Vered and Rao, 2007) จนเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างอ้อย 6 และ 8 เดือน ซึ่งเป็นช่วงที่อ้อยมีการเจริญเติบโตน้อยลงเริ่มมีการสะสมน้ำตาลเพิ่มขึ้น จึงทำให้การสะสมแคดเมียมของใบและชานอ้อยลดลง

ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อย พบว่า น้ำอ้อยมีความสามารถในการสะสมแคดเมียมได้ แต่มีในปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนอื่นๆ ของอ้อย โดยพบการสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น แต่มีปริมาณการสะสมค่อนข้างน้อย หรือไม่มีมากนัก

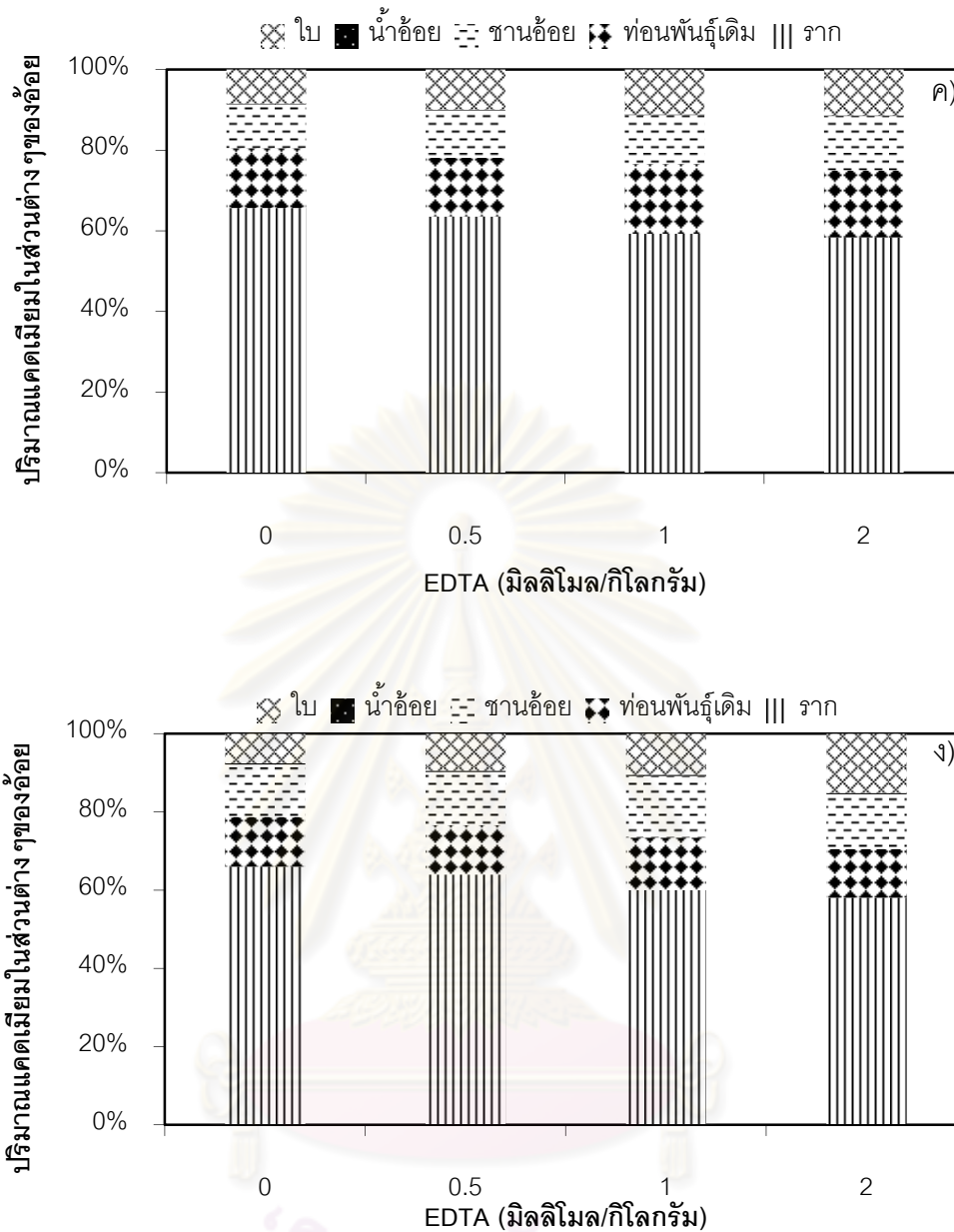
จากรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่าสาร EDTA เป็นตัวช่วยให้อ้อยมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินได้ดีกว่าการไม่เติมสาร EDTA โดยสามารถช่วยเพิ่มการดูดซับแคดเมียมจากส่วนรากขึ้นไปอยู่ในส่วนอื่นๆ ของอ้อย ได้มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสาร EDTA สามารถจับกับแคดเมียม ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนัก (Complex Metal Ion) ให้อยู่ในรูปที่ง่ายต่อการดูดซับของพืชได้ ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Santos *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาการใช้สาร EDTA และสาร EDDS ต่อการสะสมแคดเมียมในหญ้า (*Brachiaria decumbens*) พบว่าสาร EDTA ช่วยให้พืชมีความสามารถในการเพิ่มการสะสมแคดเมียมในส่วนของลำต้นพืชได้สูง 1.77 เท่า เมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารคีเลต



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.24 ความสามารถของสาร EDTA ในการช่วยดูดดึงกรดเมียมไปไว้ในส่วนต่างๆ ของอ้อย ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง ก) 2 เดือน ข) 4 เดือน ค) 6 เดือน และ ง) 8 เดือน



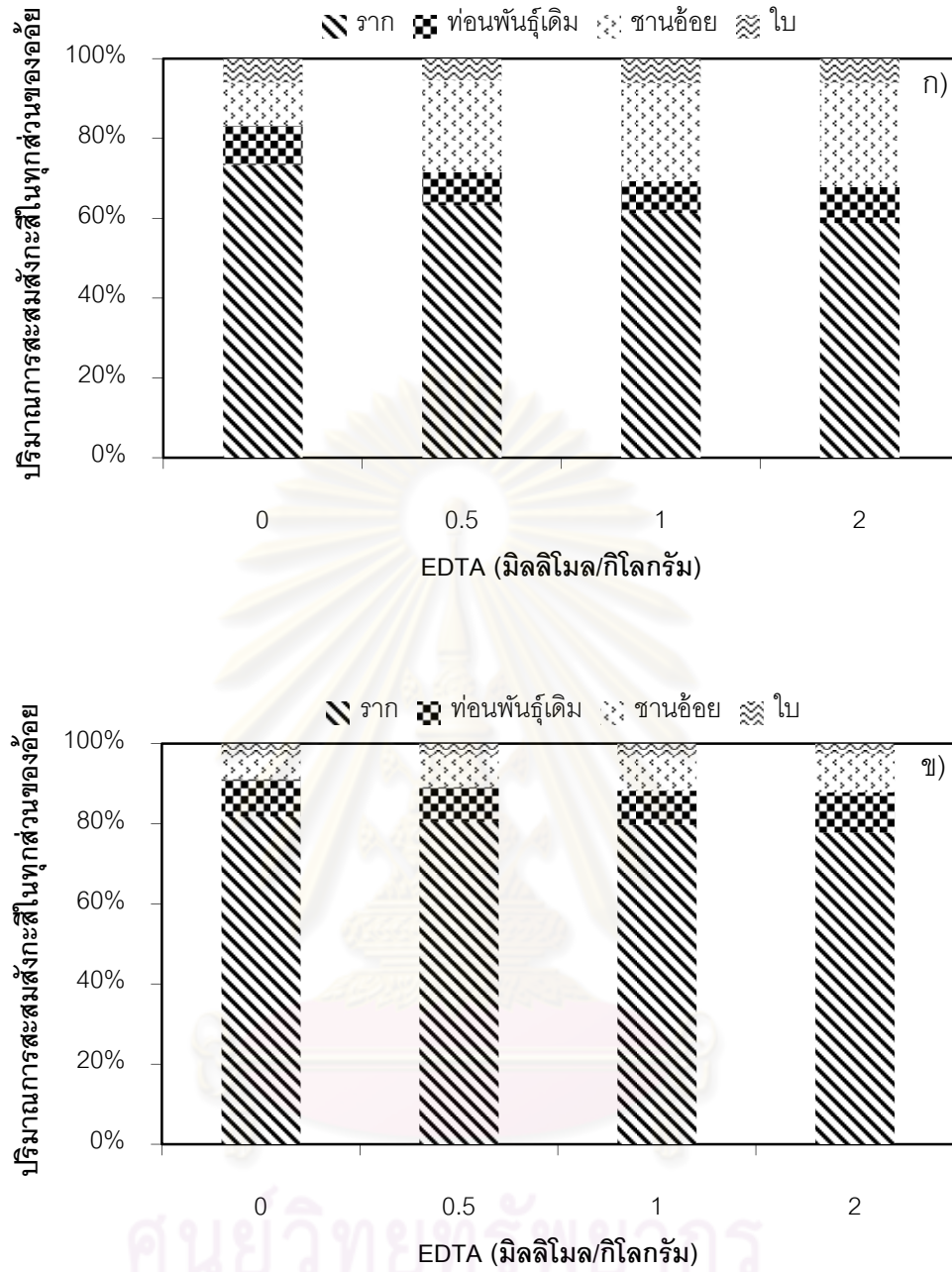
รูปที่ 4.24 ความสามารถของสาร EDTA ในการช่วยดูดดึงแคดเมียมไปไว้ในส่วนต่างๆ ของข้อย ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง ก) 2 เดือน ข) 4 เดือน ค) 6 เดือน และ ง) 8 เดือน (ต่อ)

4.6.2 การเปรียบเทียบผลของสาร EDTA ต่อความสามารถในการสะสมสังกะสีไว้ในส่วนต่างๆ ของอ้อย

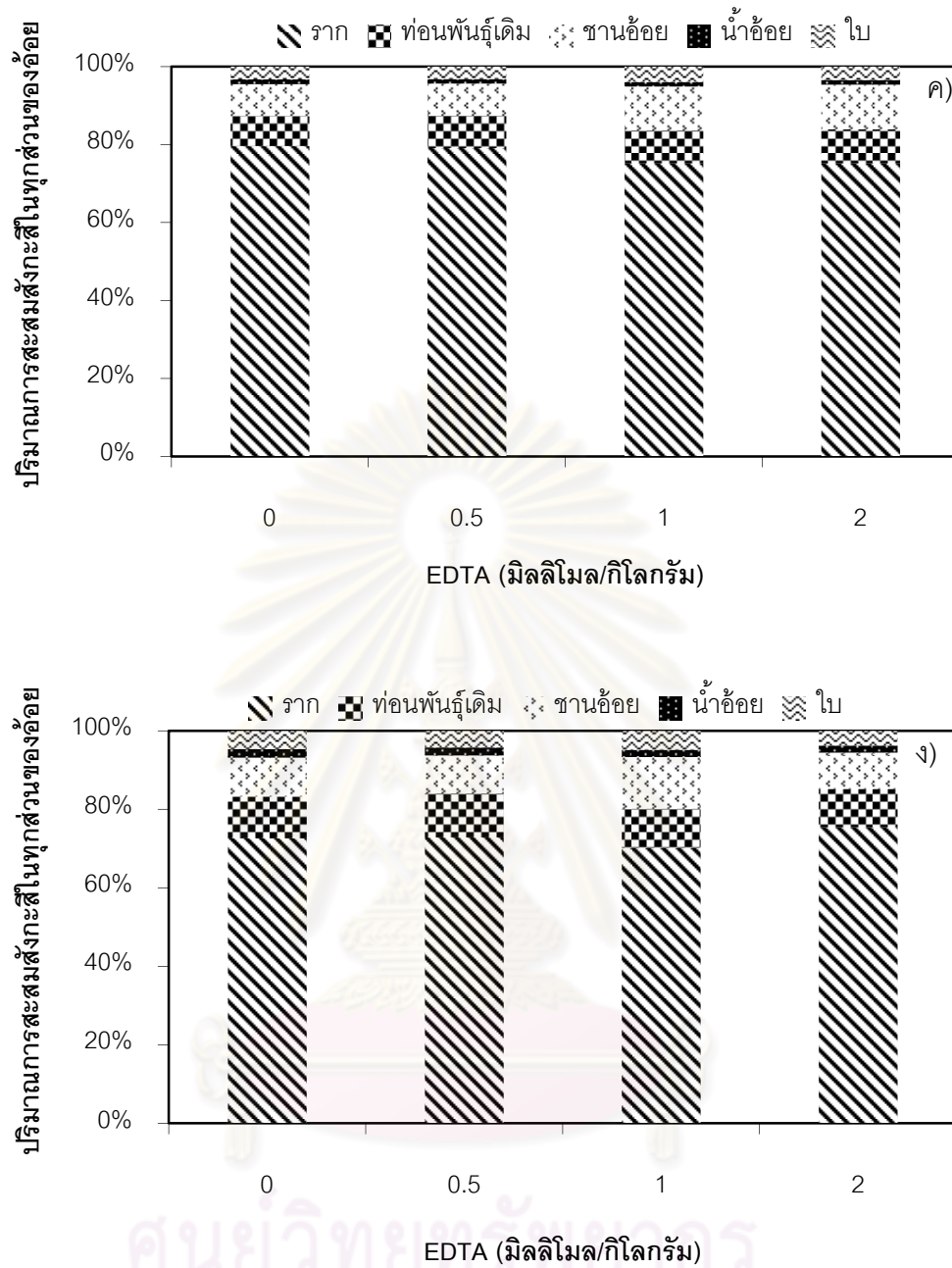
จากรูปที่ 4.25 แสดงถึงการเปรียบเทียบผลของสาร EDTA ที่ช่วยดูดดึงสังกะสีไปไว้ในส่วนต่างๆ ของอ้อย พบว่า การดูดดึงสังกะสีของอ้อยมีความแตกต่างจากการดูดดึงของแคดเมียม กล่าวคือ อ้อยสามารถดูดดึงสังกะสีไปสะสมในส่วนต่างๆ ได้มากกว่าการดูดดึงแคดเมียม และปริมาณการดูดดึงสังกะสีมีค่ามากที่สุดในส่วนของรากอ้อย รองลงมาได้แก่ ชานอ้อย ท่อนพันธุ์เดิม ใบ และน้ำอ้อย ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุที่รากอ้อยสามารถดูดดึงสังกะสีได้มากกว่าส่วนอื่นๆ เนื่องจากรากเป็นส่วนที่สัมผัสกับดินและมีความสามารถในการดูดดึงสังกะสีได้โดยตรง พร้อมทั้งรากยังมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูง จึงเกิดการเคลื่อนย้ายไอออนจากภายนอกเข้าสู่พืชโดยผ่านทางราก (Kadlec และ Knight, 1996)

นอกจากนี้ยังพบว่า การใส่สาร EDTA มีส่วนช่วยให้อ้อยสามารถเพิ่มการสะสมสังกะสีได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศศิธร ใฝ่สังจะธรรม (2549) ที่ศึกษาประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีออกจากดินด้วยหญ้าแฝกสองกลุ่มพันธุ์ โดยมีกรใส่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า สาร EDTA สามารถเพิ่มอัตราการดูดดึงสังกะสีของหญ้าแฝกได้ เนื่องจาก EDTA เป็นสารจำพวกคีเลต ซึ่งสารเหล่านี้เป็นสารที่ให้ไอออนของโลหะหรือจุลธาตุเหล่านี้ยึดเกาะเกิดเป็นสารประกอบคีเลตจึงทำให้เกิดการละลายของโลหะได้ดี (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) หรือสามารถรวมตัวกับจุลธาตุเป็นสารประกอบคีเลต และเป็น การปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชได้ที่ละน้อย ซึ่งไอออนของโลหะส่วนใหญ่มักจะอยู่รวมตัวกับคีเลต (สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์, 2544)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



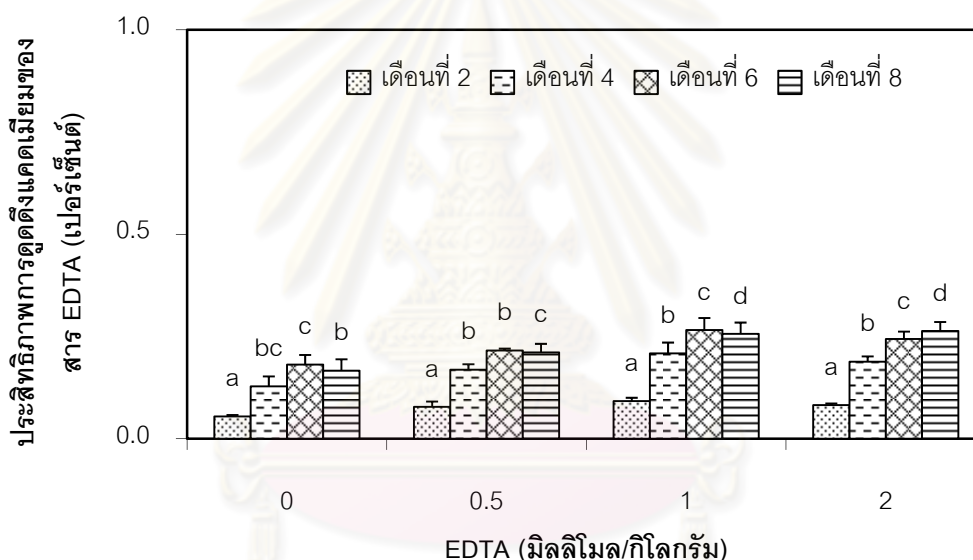
รูปที่ 4.25 ความสามารถของสาร EDTA ในการช่วยดูดดึงสังกะสีไปไว้ในส่วนต่างๆ ของอ้อย ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 1) 2 เดือน 2) 4 เดือน 3) 6 เดือน และ 4) 8 เดือน



รูปที่ 4.25 ความสามารถของสาร EDTA ในการช่วยดูดดึงสังกะสีไปไว้ในส่วนต่างๆ ของอ้อย ที่ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 1) 2 เดือน 2) 4 เดือน 3) 6 เดือน และ 4) 8 เดือน (ต่อ)

4.6.3 ผลของสาร EDTA ต่อประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมของอ้อย

การศึกษาประสิทธิภาพของสาร EDTA ในการดูดดึงแคดเมียมของอ้อย โดยได้ทำการศึกษาจากผลรวมปริมาณการสะสมแคดเมียมของอ้อยทั้งต้น รูปที่ 4.26 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุม กับชุดการทดลองที่มีการใส่ EDTA ทั้งสิ้น 3 ระดับความเข้มข้น คือ 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน ของแต่ละชุดการทดลอง โดยมีปริมาณการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยทั้งต้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ทั้งนี้ประสิทธิภาพของสาร EDTA ที่ช่วยดูดดึงแคดเมียมของอ้อยทั้งต้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น แต่พบว่าที่ระยะเวลา 6 และ 8 เดือน จะมีเปอร์เซ็นต์ของการดูดดึงแคดเมียมค่อนข้างใกล้เคียงกันที่ความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง

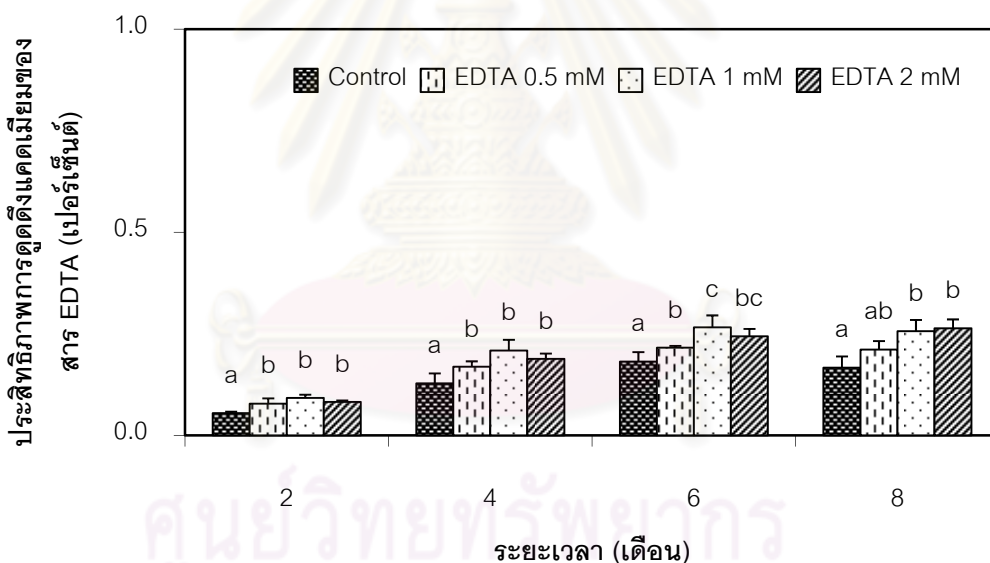


รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพของสาร EDTA ในการช่วยดูดดึงแคดเมียมของอ้อยทั้งต้นที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT

จากรูปที่ 4.27 ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสาร EDTA ในการดูดดึงแคดเมียมของอ้อยทั้งต้นที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง เพื่อศึกษาถึงความแตกต่างของระดับความเข้มข้นของสาร EDTA ว่ามีผลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดดึงแคดเมียมหรือไม่ ซึ่งการศึกษารั้งนี้พบว่าที่ระยะเวลา 6 เดือน การใส่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มี

ประสิทธิภาพเพิ่มการสะสมแคดเมียมในอ้อยทั้งต้นมากที่สุดเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ มีค่าเท่ากับ 0.27 เปอร์เซ็นต์ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามสาร EDTA ยังช่วยส่งผลให้อ้อยมีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากสาร EDTA สามารถเข้าจับยึดกับแคดเมียมไอออนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Cd-EDTA Complex) จึงง่ายต่อการดูดดึงของพืช และช่วยเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากขึ้นสู่ส่วนยอดของพืชได้เพิ่มขึ้น (Nascimento et al., 2006) จึงทำให้พืชมีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Lombi et al. (2001) ได้ศึกษาการใช้สาร EDTA เพื่อช่วยการดูดดึงแคดเมียมในพืช 2 ชนิด คือ *Thlaspi caerulescens*. และข้าวโพด (*Zea mays* L.) ผลการศึกษาพบว่า สาร EDTA มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดดึงสมแคดเมียมในพืชทั้ง 2 ชนิดได้ ทั้งนี้ความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักของพืชจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ความเข้มข้นของโลหะหนัก และความเข้มข้นของสารคีเลต รวมทั้งปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น ปัจจัยทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ

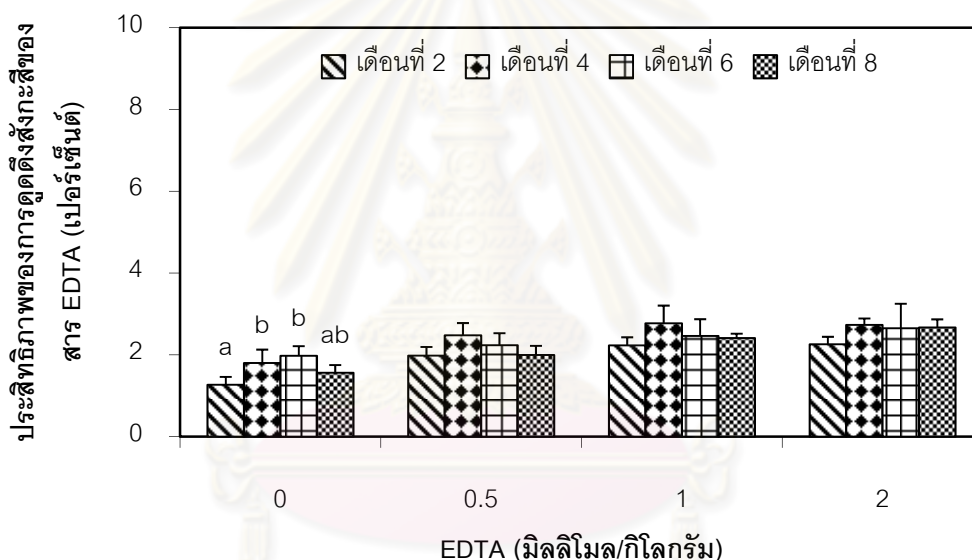


รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพของสาร EDTA ในการช่วยดูดดึงแคดเมียมของอ้อยทั้งต้นที่ระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

4.6.4 ผลของสาร EDTA ต่อประสิทธิภาพในการดูดดึงสังกะสีของอ้อย

จากรูปที่ 4.28 แสดงถึงประสิทธิภาพของสาร EDTA ในการดูดดึงสังกะสีของอ้อย ซึ่งพบว่าที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA แต่ละชุดการทดลอง ที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน อ้อยมีประสิทธิภาพในการดูดดึง และสะสมแคดเมียมไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าในแต่ละช่วงของการเก็บตัวอย่างอ้อยมีปริมาณการดูดดึงสังกะสีไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่า อ้อยมีประสิทธิภาพในการดูดดึงสังกะสีได้มากที่สุด ที่ระยะเวลา 4 เดือน มีค่าเท่ากับ 1.80, 2.48, 2.77 และ 2.73 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดดึงสังกะสีของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มลดลงที่ระยะเวลา 6 และ 8 เดือน

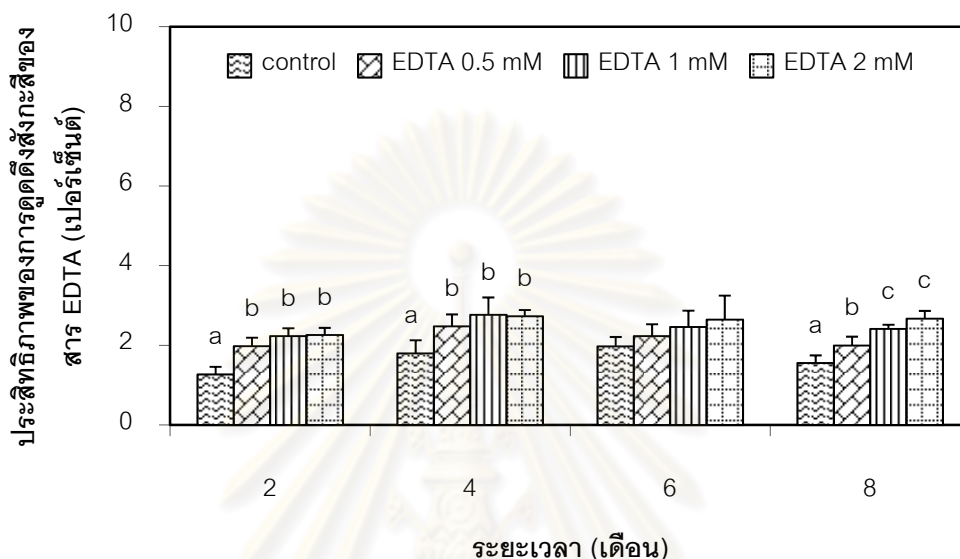


รูปที่ 4.28 ประสิทธิภาพของสาร EDTA ในการช่วยดูดดึงสังกะสีของอ้อยทั้งต้นที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความเข้มข้นเดียวกันแต่ระยะเวลาต่างกันตามวิธีการของ DMRT

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสาร EDTA ในการดูดดึงสังกะสีของอ้อยทั้งต้น แสดงดังรูปที่ 4.29 โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุมที่ไม่มีการใส่สาร EDTA กับชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA 3 ระดับ ได้แก่ 0.5, 1, 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน พบว่า อ้อยมีประสิทธิภาพในการดูดดึงสังกะสี โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) ในทุกชุดการทดลอง และยัง

พบว่า ชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA ที่ความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีแนวโน้มการดูดตั้งสังกะสีโดยรวมมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 2.26, 2.73, 2.65 และ 2.67 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน ตามลำดับ แต่ทั้งนี้ที่ระยะเวลา 4 เดือนของชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีประสิทธิภาพในการดูดตั้งสังกะสีมากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 2.77 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพของสาร EDTA ในการช่วยดูดตั้งสังกะสีของอ้อยทั้งต้นที่ระยะเวลาต่างๆของการทดลอง (n=3)

หมายเหตุ ตัวอักษรบนกราฟ หมายถึง ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างชุดการทดลองในเวลาเดียวกัน ตามวิธีการของ DMRT

จากผลการศึกษาดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 ทำให้ทราบได้ว่า สาร EDTA มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดตั้งสังกะสีของอ้อยได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Weihong et al (2008) ที่ศึกษาถึงผลกระทบของโลหะหนัก 2 ชนิด ได้แก่ สังกะสี และ แคดเมียม รวมทั้งได้ศึกษาถึงผลของสาร EDTA ต่อการเจริญเติบโต และการดูดตั้งโลหะหนักในหญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) โดยใส่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0.8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ผลการศึกษาพบว่า ภายหลังจากใส่สาร EDTA มีผลทำให้ปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนเหนือดิน (Shoot) และได้ดิน (Root) เพิ่มขึ้น 7.3% และ 37.4% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดินของหญ้าแฝกมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับชุดควบคุม โดยมีค่าเท่ากับ 14.2%, 14.1% และ 17.0% ในชุดการทดลองที่เติมสังกะสี แคดเมียม และโลหะหนักทั้งสองชนิด ตามลำดับ ส่วนน้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดินของหญ้าแฝกเมื่อนำไปเทียบกับชุดควบคุม พบว่า มีค่าลดลง 17.3%, 32.5% และ 35.7% ในชุดการทดลองที่เติมสังกะสี แคดเมียม และโลหะหนักทั้งสองชนิด ตามลำดับ เช่นกัน

4.7 การประมาณการค่าใช้จ่าย

จากการศึกษาผลของสาร EDTA ต่อการดูดซับแคดเมียม และสังกะสีของอ้อย พบว่าความเข้มข้นของสาร EDTA สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากที่สุด คือ การใส่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ดังนั้นจึงทำการคำนวณสาร EDTA จากระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมดังกล่าวโดยคิดเป็นต้นทุนในการบำบัดเป็นบาทต่อไร่ (ดังตารางที่ 4.29) พบว่า ค่าการลงทุนในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม และสังกะสี และมีการเติมสาร EDTA พบว่า การเติมสาร EDTA ในเกรด Analytical Reagent มีประสิทธิภาพ 99 เปอร์เซ็นต์ มีค่าใช้จ่ายต่อไร่เท่ากับ 190,080 บาท ซึ่งถือว่ามีความคุ้มค่าในการบำบัดที่ค่อนข้างสูง ทั้งนี้จึงได้ทำการคำนวณการใช้สาร EDTA ในเกรด Commercial มีประสิทธิภาพ 90 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีราคาในการบำบัดต่อไร่เพียง 19,800 บาทเท่านั้น

ตารางที่ 4.29 แสดงค่าใช้จ่ายในการลงทุน (บาทต่อไร่)

สารเคีเลต	ราคา (บาท/ไร่)
EDTA (Analytical Reagent)	190,080
EDTA (Commercial Grade)	19,800

หมายเหตุ วิธีการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ก

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนในการบำบัดโลหะหนักต่อไร่ข้างต้น พบว่า การใช้สาร EDTA ในเกรด Analytical Reagent มีประสิทธิภาพ 99 เปอร์เซ็นต์ สามารถเพิ่มการดูดซับแคดเมียมได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.27 เปอร์เซ็นต์ (จากผลการศึกษาดังรูปที่ 4.27) และเพิ่มการดูดซับสังกะสีเท่ากับ 2.77 เปอร์เซ็นต์ (จากผลการศึกษาดังรูปที่ 4.29) ดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของสาร EDTA ในเกรด Commercial ซึ่งมีประสิทธิภาพ 90 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน โดยสามารถดูดซับแคดเมียม และสังกะสี ได้เท่ากับ 0.25 และ 2.52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ถึงแม้ว่าสาร EDTA ในเกรด Commercial จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้น้อยกว่า สาร EDTA ในเกรด Analytical Reagent แต่พบว่า ไม่แตกต่างกันมากนัก และการใช้สาร EDTA ในเกรด Commercial มีราคาในการบำบัดต่อไร่ถูกกว่า สาร EDTA ในเกรด Analytical Reagent ประมาณ 10 เท่า (วิธีการคำนวณดังภาคผนวก ก) ดังนั้นในกรณีที่จะนำไปใช้ในพื้นจริง เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการบำบัด อาจนำสาร EDTA ในเกรด Commercial ซึ่งมีความสามารถในการบำบัดที่ใกล้เคียงกันไปประยุกต์ใช้ได้

4.8 สมดุลมวล (Mass Balance) ของสาร EDTA ต่อการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีของอ้อย

การทำสมดุลมวล เพื่อศึกษาปริมาณแคดเมียม และสังกะสีที่มีอยู่ในระบบ โดยทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม และสังกะสีในดินทั้งหมด และปริมาณแคดเมียม และสังกะสีที่อยู่ในอ้อย โดยแยกปริมาณการสะสมแคดเมียม และสังกะสีออกเป็นส่วนต่างๆ ของอ้อย ได้แก่ ใบ ชานอ้อย ท่อนพันธุ์เดิม ราก และน้ำอ้อย รวมทั้งน้ำชะ เพื่อให้เห็นเปอร์เซ็นต์ของการสะสมที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ผลการศึกษาดังกล่าว ได้ทำทุกระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน ดังได้แสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 4.30 และ 4.31 ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า ปริมาณแคดเมียม และสังกะสีในระบบที่หายไปนั้น อาจติดอยู่กับภาชนะปลูกหรือพลาสติกหุ้มถุง และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง จึงทำให้ปริมาณแคดเมียม และสังกะสีบางส่วนหายไปจากระบบ ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณแคดเมียม และสังกะสีที่สูญหายไปจากระบบโดยเฉลี่ยทุกระดับความเข้มข้น และทุกระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 20 และ 13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.30 สมดุลมวล (Mass Balance) ของสาร EDTA ต่อการดูดซับแคดเมียมของอ้อย

ระยะ เวลา (เดือน)	ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียม (มิลลิกรัม)							ปริมาณแคดเมียม (เปอร์เซ็นต์)							ผลรวม ปริมาณ แคดเมียม ทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)
		ดิน	น้ำ ชะ	อ้อย					ดิน	น้ำ ชะ	อ้อย					
				ใบ	ชาน	ท่อน พันธุ์ เดิม	ราก	น้ำ อ้อย			ใบ	ชาน	ท่อน พันธุ์ เดิม	ราก	น้ำ อ้อย	
2	Control	1,199.66	0.69	0.17	0.12	0.21	0.25	0.00	87.91	0.05	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	88.01
	EDTA 0.5 mM	1,170.18	0.72	0.23	0.17	0.32	0.34	0.00	85.75	0.05	0.02	0.01	0.02	0.03	0.00	85.88
	EDTA 1.0 mM	1,158.23	0.80	0.28	0.26	0.34	0.38	0.00	84.87	0.06	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00	85.02
	EDTA 2.0 mM	1,161.70	0.83	0.27	0.23	0.30	0.34	0.00	85.12	0.06	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	85.27
4	Control	1,157.47	0.88	0.34	0.53	0.21	0.67	0.00	84.81	0.06	0.02	0.04	0.01	0.05	0.00	85.01
	EDTA 0.5 mM	1,120.80	0.91	0.45	0.72	0.29	0.84	0.00	82.13	0.07	0.03	0.05	0.02	0.06	0.00	82.36
	EDTA 1.0 mM	1,048.53	0.99	0.73	0.87	0.33	0.90	0.00	76.83	0.07	0.05	0.06	0.02	0.07	0.00	77.11
	EDTA 2.0 mM	1,077.34	1.11	0.63	0.82	0.31	0.80	0.00	78.94	0.08	0.05	0.06	0.02	0.06	0.00	79.21
6	Control	1,081.88	0.70	0.36	0.66	0.23	1.22	0.01	79.28	0.05	0.03	0.05	0.02	0.09	0.00	79.51
	EDTA 0.5 mM	1,072.74	0.73	0.49	0.85	0.29	1.30	0.01	78.61	0.05	0.04	0.06	0.02	0.09	0.00	78.87
	EDTA 1.0 mM	1,000.49	0.83	0.70	1.04	0.54	1.33	0.01	73.31	0.06	0.05	0.08	0.04	0.10	0.00	73.64
	EDTA 2.0 mM	1,025.50	0.85	0.60	0.88	0.36	1.53	0.02	75.14	0.06	0.04	0.06	0.03	0.11	0.00	75.45

ตารางที่ 4.30 สมดุลมวล (Mass Balance) ของสาร EDTA ต่อการดูดซับแคดเมียมของขี้เถ้า (ต่อ)

ระยะเวลา (เดือน)	ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียม (มิลลิกรัม)							ปริมาณแคดเมียม (เปอร์เซ็นต์)							ผลรวม ปริมาณ แคดเมียม ทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)
		ดิน	น้ำ ชะ	ขี้เถ้า					ดิน	น้ำ ชะ	ขี้เถ้า					
				ใบ	ชาน	ท่อน พันธุ์ เดิม	ราก	น้ำ ขี้เถ้า			ใบ	ชาน	ท่อน พันธุ์ เดิม	ราก	น้ำ ขี้เถ้า	
8	Control	1,023.61	0.81	0.28	0.72	0.14	1.13	0.01	75.01	0.06	0.02	0.05	0.01	0.08	0.00	75.23
	EDTA 0.5 mM	1,020.46	0.86	0.39	0.87	0.18	1.42	0.03	74.78	0.06	0.03	0.06	0.01	0.10	0.00	75.05
	EDTA 1.0 mM	960.83	0.91	0.55	1.12	0.24	1.55	0.03	70.41	0.07	0.04	0.08	0.02	0.11	0.00	70.73
	EDTA 2.0 mM	983.44	1.12	0.51	1.23	0.18	1.74	0.04	72.06	0.08	0.04	0.09	0.01	0.12	0.00	72.40

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.31 สมดุลมวล (Mass Balance) ของสาร EDTA ต่อการดูดซับสังกะสีของอ้อย

ระยะเวลา (เดือน)	ชุดการทดลอง	ปริมาณสังกะสี (มิลลิกรัม)							ปริมาณสังกะสี (เปอร์เซ็นต์)							ผลรวม ปริมาณ สังกะสี ทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)
		ดิน	น้ำ ชะ	อ้อย					ดิน	น้ำ ชะ	อ้อย					
				ใบ	ชาน	ท่อน พันธุ์ เดิม	ราก	น้ำ อ้อย			ใบ	ชาน	ท่อน พันธุ์ เดิม	ราก	น้ำ อ้อย	
2	Control	38,642.76	3.63	2.16	2.62	2.69	9.87	0.00	93.40	0.27	0.16	0.19	0.20	0.73	0.00	94.95
	EDTA 0.5 mM	38,285.39	3.76	2.56	7.76	3.59	13.30	0.00	92.53	0.28	0.19	0.56	0.27	0.97	0.00	94.80
	EDTA 1.0 mM	38,873.46	3.89	3.04	10.72	2.99	13.77	0.00	93.96	0.28	0.22	0.78	0.22	1.01	0.00	96.47
	EDTA 2.0 mM	38,805.27	5.87	3.35	10.51	4.12	12.95	0.00	93.79	0.43	0.24	0.77	0.31	0.94	0.00	96.48
4	Control	37,295.00	0.81	1.62	4.01	2.86	16.14	0.00	90.14	0.06	0.12	0.29	0.21	1.18	0.00	92.00
	EDTA 0.5 mM	36,776.96	4.13	1.93	7.48	3.06	21.34	0.00	88.89	0.30	0.14	0.55	0.22	1.56	0.00	91.67
	EDTA 1.0 mM	35,929.34	4.17	2.40	8.02	3.32	23.48	0.00	86.84	0.31	0.18	0.58	0.24	1.77	0.00	89.92
	EDTA 2.0 mM	37,295.17	6.26	2.06	9.36	4.05	21.66	0.00	90.14	0.46	0.15	0.69	0.30	1.59	0.00	93.32
6	Control	33,596.37	4.21	1.66	5.80	1.42	17.47	0.49	81.20	0.31	0.12	0.42	0.11	1.29	0.04	83.49
	EDTA 0.5 mM	32,970.16	4.08	1.85	7.00	1.97	19.03	0.68	79.69	0.30	0.14	0.51	0.14	1.39	0.05	82.22
	EDTA 1.0 mM	31,359.17	4.14	2.56	9.94	2.73	17.35	1.02	75.79	0.30	0.19	0.73	0.20	1.27	0.07	78.56
	EDTA 2.0 mM	30,230.09	4.86	2.25	9.42	2.03	21.03	1.18	73.06	0.36	0.16	0.69	0.14	1.57	0.09	76.07

ตารางที่ 4.31 สมดุลมวล (Mass Balance) ของสาร EDTA ต่อการดูดซับสังกะสีของอ้อย (ต่อ)

ระยะ เวลา (เดือน)	ชุดการทดลอง	ปริมาณสังกะสี (มิลลิกรัม)							ปริมาณสังกะสี (เปอร์เซ็นต์)							ผลรวม ปริมาณ สังกะสี ทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)
		ดิน	น้ำ ชะ	อ้อย					ดิน	น้ำ ชะ	อ้อย					
				ใบ	ชาน	ท่อน พันธุ์ เดิม	ราก	น้ำ อ้อย			ใบ	ชาน	ท่อน พันธุ์ เดิม	ราก	น้ำ อ้อย	
8	Control	32,007.56	5.29	1.68	5.29	1.15	12.34	0.92	77.36	0.39	0.12	0.39	0.08	0.90	0.07	79.32
	EDTA 0.5 mM	31,169.74	5.15	1.74	6.19	1.56	16.23	1.81	75.34	0.38	0.13	0.45	0.11	1.19	0.13	77.73
	EDTA 1.0 mM	30,315.22	5.79	2.47	9.16	1.78	17.82	1.95	73.27	0.42	0.18	0.66	0.13	1.30	0.14	76.10
	EDTA 2.0 mM	30,056.30	6.00	2.05	7.64	1.44	23.03	2.30	72.64	0.44	0.15	0.56	0.10	1.69	0.17	75.75

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลของสาร EDTA ต่อการดูดตั้งแคดเมียม และสังกะสีโดยอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน โดยใช้ดินปนเปื้อนที่เก็บมาจากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ที่มีปริมาณแคดเมียม และสังกะสีปนเปื้อน เท่ากับ 136.47 และ 4,137.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ใส่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ในแต่ละชุดการทดลอง หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน ซึ่งผลการศึกษาสามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลของสาร EDTA ต่อการสะสมแคดเมียมและสังกะสีในดิน

ผลของสาร EDTA ต่อการสะสมแคดเมียม และสังกะสีในดิน รวมถึงในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Available) พบว่า ที่ระยะเวลาของการศึกษาที่ 2, 4, 6 และ 8 เดือน ของทุกชุดการทดลอง มีปริมาณการสะสมแคดเมียม และสังกะสีในดินลดลง สำหรับการสะสมแคดเมียมในดินมีค่าน้อยที่สุดที่ระยะเวลา 8 เดือน มีค่าเท่ากับ 102.36, 102.05, 96.08 และ 98.34 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ และการสะสมสังกะสีในดินมีค่าน้อยที่สุดที่ระยะเวลา 8 เดือน มีค่าเท่ากับ 3,200.76, 3,116.97, 3,031.52 และ 3,005.63 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระดับความเข้มข้น 0 (ควบคุม), 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ตามลำดับ ทั้งนี้ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA มีปริมาณการสะสมแคดเมียม และสังกะสีในดินน้อยกว่าในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสาร EDTA ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสาร EDTA ทำให้พืชเพิ่มการดูดตั้งแคดเมียม และสังกะสีในดิน จึงทำให้ปริมาณแคดเมียม และสังกะสีในดินลดลง

5.1.2 ผลของสาร EDTA ต่อการดูดตั้งแคดเมียม และสังกะสีในส่วนต่าง ๆ ของอ้อย

ปริมาณการดูดตั้งแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อย พบว่า ในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสาร EDTA จะมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อยน้อยกว่า ในชุดที่มีการเติมสาร

EDTA ทั้งนี้การเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีผลทำให้เพิ่มการดูดซับแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของอ้อยได้มากที่สุด โดยพบว่า ใบและชานอ้อยมีแนวโน้มของการสะสมแคดเมียมเพิ่มสูงขึ้นถึงระยะเวลา 4 เดือน และลดลงที่ระยะเวลา 6 และ 8 เดือน แต่มีแนวโน้มแตกต่างจากท่อนพันธุ์เดิม และราก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระยะเวลาเก็บตัวอย่าง 6 เดือน และลดลงที่ระยะเวลา 8 เดือน สำหรับในน้ำอ้อย พบว่า เมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น การสะสมแคดเมียมในน้ำอ้อยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของการเติม EDTA

สำหรับปริมาณการดูดซับสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อย พบว่า ชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA จะมีปริมาณการสะสมสังกะสีในส่วนต่างๆ ของอ้อยได้มากกว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการใส่สาร EDTA ทั้งนี้พบว่า ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ของสาร EDTA มีผลทำให้อ้อยดูดซับสังกะสีได้มากที่สุด โดยใบและชานอ้อยมีการสะสมสังกะสีมากที่สุดที่ระยะเวลา 2 เดือน ในทุกชุดการทดลอง ส่วนการสะสมสังกะสีในส่วนท่อนพันธุ์เดิม และรากมากที่สุดที่ระยะเวลา 4 เดือน สำหรับในน้ำอ้อย พบว่า การสะสมสังกะสีจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น

5.1.3 ผลของสาร EDTA ต่อการเจริญเติบโตของอ้อย

1) น้ำหนักแห้งในส่วนต่างๆ ของอ้อยได้แก่ ใบ ชานอ้อย ท่อนพันธุ์เดิม ราก และน้ำอ้อย มีความแตกต่างกันดังนี้ สำหรับน้ำหนักแห้งในส่วน ใบ ชานอ้อย ราก และน้ำอ้อย มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้นในทุกชุดการทดลอง ส่วนน้ำหนักแห้งในส่วนท่อนพันธุ์เดิม มีค่าลดลง เมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้นในทุกชุดการทดลอง และพบว่า การเติมสาร EDTA ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของอ้อย โดยพืชไม่แสดงอาการใดๆ และน้ำหนักแห้งโดยรวมของอ้อยไม่มีความแตกต่างกันมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองไม่ใส่สาร EDTA โดยพืชที่มีการเติมสาร EDTA จะมีน้ำหนักแห้งโดยรวมมากกว่าชุดควบคุมเพียงเล็กน้อย

2) สำหรับผลของสาร EDTA ต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงของลำต้น และความยาวรากของอ้อย พบว่า ชุดควบคุมที่ไม่มีการใส่สาร EDTA และชุดที่มีการใส่สาร EDTA มีแนวโน้มของความสูงของลำต้น และความยาวรากของอ้อย เพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะเวลาการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสาร EDTA ไม่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงของลำต้น และความยาวของรากอ้อย

5.1.4 ผลของสาร EDTA ต่อประสิทธิภาพในการดูดตั้งแคดเมียม และสังกะสีของอ้อย

ประสิทธิภาพของสาร EDTA ในการดูดตั้งแคดเมียมของอ้อยทั้งต้นมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่าที่ระยะเวลา 6 เดือน การใส่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีประสิทธิภาพเพิ่มการสะสมแคดเมียมในอ้อยทั้งต้นมากที่สุดเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ มีค่าเท่ากับ 0.27 เปอร์เซ็นต์ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.05$) และประสิทธิภาพของสาร EDTA ต่อการดูดตั้งสังกะสีของอ้อยพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 4 เดือน มีค่าประสิทธิภาพในการดูดตั้งสังกะสีมากที่สุด เท่ากับ 2.77 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า สาร EDTA มีความสามารถในการช่วยเพิ่มการดูดตั้งแคดเมียม และสังกะสีออกจากดินที่ปนเปื้อนได้ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพในการดูดตั้งของแคดเมียม และสังกะสีแล้ว ระดับความเข้มข้นของสาร EDTA มีประสิทธิภาพมากที่สุด ได้แก่ 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบพันธุ์อ้อยหลายๆ สายพันธุ์ ที่มีความเหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศ และสภาพอากาศในบริเวณนั้น เพื่อให้ได้พันธุ์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดตั้งแคดเมียมสูงสุด

5.2.2 ควรมีการศึกษาการใช้สารคีเลตชนิดอื่น เช่น EDDS, Citric Acid และ NTA เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบความสามารถ และประสิทธิภาพในการดูดตั้งโลหะหนัก ของสารคีเลตชนิดต่างๆ

5.2.3 สำหรับการนำสารคีเลตไปใช้ในพื้นที่จริงนั้น ควรมีการศึกษาผลของสารคีเลตต่อหน้าใต้ดิน เนื่องจากถ้าในพื้นที่จริงมีระดับน้ำใต้ดินสูง อาจส่งผลกระทบต่อ การปนเปื้อนของโลหะหนัก หรือสารคีเลตลงสู่หน้าใต้ดิน ทำให้เกิดการปนเปื้อนออกสู่พื้นที่ใกล้เคียงได้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกษม สุขสถาน อุดม พูลเกษ และบัญญัติ โกมลวาท. 2520. พันธุ์อ้อยที่ปลูกเป็นการค้าในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: พันธุ์พืชบลิซซิ่ง.
- เกษมศรี ชับซ้อน. 2541. ปฐพีวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: นานาสั่งพิมพ์.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. คู่มือปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2541. แคดเมียม (Cadmium). จุลสาร. กรุงเทพมหานคร.
- จันทร์ศรี ดนุนาถ. 2539. การหาปริมาณโลหะหนักบางตัวในตัวอย่างน้ำจากแม่น้ำปิง และแม่น้ำกวังปี. 2538. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ชวนพิศ แดงสวัสดิ์. 2544. สรีรวิทยาของพืช. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: มัธยมศึกษา.
- ชิตชนก อัสวโกตี. 2550. ผลของตัวคีเลตต่อการสะสมแคดเมียมของทานตะวัน *Helianthus annuus* Linn. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทัศนีย์ อุตตะนันท์. 2543. ดินที่ใช้ปลูกข้าว. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- ทิพวรรณ พจนานภรณ์ และ พันธวิศ สัมพันธ์พานิช. 2552. ผลของอีดีทีเอ และอีดีดีเอสต่อการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้สับปะรด. วารสารวิชาการ ม.อ.บ. 11, 4 (กรกฎาคม): 11-17.
- นันทกานต์ ชุนโหร. 2549. การดูดซับแคดเมียมในดินและการดูดกินโดยผักกาดขาวในชุดดินปากช่อง และชุดดินธนบุรี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปรีชา พรหมณีย์. 2541. การจัดการดินและการใช้ปุ๋ยในไร่อ้อย. เอกสารเผยแพร่อันดับที่ 57. กรุงเทพมหานคร: สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปรีดา พากเพียร, อภิสสิทธิ์ เอี่ยมหน่อ, ไฮเนส เอ็กการ์ด และธวัชชัย ณ นคร. 2541. โลหะหนักแหล่งที่มา ค่ามาตรฐานและการทำปฏิกิริยากับดิน. วารสารดินและปุ๋ย. 20, 2 (เมษายน-มิถุนายน): 41-49.
- พันธวิศ สัมพันธ์พานิช. 2549. เรื่องเก่าที่คุ้นเคย...กับคำใหม่ที่เรียกว่า...Phytoremediation. วารสารสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ฉบับที่ 1 ปีที่ 10. ม.ค.-มี.ค. 2549: 48-54.

- ไพบูลย์ วิวัฒน์วงศ์วนา. 2546. เคมีดิน. 500 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. เชียงใหม่: เชียงใหม่พิมพ์สวย.
มันลิน ตัณฑุลเวศม์ และ มันรัช ตัณฑุลเวศม์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1.
โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มาลินี สุขแสงพนมรุ่ง. 2544. ต้นไม้กับสารโลหะหนัก. ข่าวสารศูนย์ข้อมูลเทคโนโลยีชีวภาพและความปลอดภัยทางชีวภาพ. 23(2): 12.
- มุกดา สุขสวัสดิ์. 2544. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. 2,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- ไมตรี สุทธิจิตต์. 2531. สารพิษรอบตัวเรา. เชียงใหม่: โรงพิมพ์ดาราคอมพิวเตอร์กราฟิก.
- ยงยุทธ โอสถสภา. 2543. ธาตุอาหารพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วราภรณ์ ศรีตัมภวา และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2551. การดูดตั้งแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน. วารสารวิจัย มช. (ฉบับบัณฑิตศึกษา) 8, 1 (มกราคม-มีนาคม): 1-6.
- วราภรณ์ ศรีตัมภวา. 2550. การดูดตั้งแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิชนันท์ ธรรมบำรุง. 2545. การดูดตั้งสารหนูที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้เผือกและบอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิชาการเกษตร, กรม. 2523. อ้อย. 3,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. เอกสารวิชาการ เล่มที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ธนประดิษฐ์การพิมพ์.
- วิชาการเกษตร, กรม. กองปฐพีวิทยา. 2544. คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช. 500 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- ศราริน กลิ่นโพธิ์กลับ. 2549. ผลของสารปรับปรุงดินที่มีต่อการดูดตั้งแคดเมียมของถั่วเหลืองที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปฐพีวิทยาภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศศิธร ไฝสัจธรรม. 2549. ประสิทธิภาพของหญ้าแฝกและหญ้าแฝกค่อนในการดูดตั้งแคดเมียมและสังกะสีออกจากดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศศิธร ไฝสัจธรรม. 2549. ประสิทธิภาพของหญ้าแฝกและหญ้าแฝกค่อนในการดูดตั้งแคดเมียมและสังกะสีออกจากดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- ศักดิ์สิรินทร์ ชีรพันธุ์เสถียร. 2538. แคดเมียมและสังกะสีในน้ำ ตะกอนและหอยกาบ *Hyriopsis myersiana* ของน้ำปิง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริมาศ สิทธิกรม. 2550. การแพร่กระจายของปริมาณแคดเมียม ทองแดง และตะกั่วในดินตะกอนบริเวณอ่าวตราด จังหวัดตราด. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์ทางทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศิริลักษณ์ กัลการชาย และธัญชัย กองแก้ว. 2548. การบำบัดแคดเมียมที่เป็นเปื้อนในดินโดยใช้หญ้าแฝก[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.scisoc.or.th/stt/31/sec_h/paper/stt31_H0020.pdf[2549, ธันวาคม 12]
- ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2545. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. 1,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์. 2544. สรีรวิทยาของพืช. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2540. อ้อย[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK5/chapter3/chap3.htm>[2552, ตุลาคม 5]
- สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2547. ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน. กรุงเทพมหานคร.
- สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง. กรมควบคุมมลพิษ. 2553. สารกรดในบรรยากาศ: มลพิษไร้พรมแดน[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/air_aciddeposition.html[2553, กันยายน 4]
- อนงนาฏ ศรีประโยชน์. 2549. การกระจายตัวของแคดเมียมในดินที่มีการปนเปื้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อรวรรณ ศิริรัตน์พิสัย. 2522. อิทธิพลของตะกั่วและแคดเมียมต่อการเจริญเติบโตและองค์ประกอบทางเคมีของพืชอาหารสัตว์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- อุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, กรม. 2549. รายงานการศึกษาวิจัยสาเหตุการปนเปื้อนแคดเมียมในดิน พื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. กรุงเทพมหานคร: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

ภาษาอังกฤษ

- Adriano, D. C. 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals. 2nd ed. New York: Springer.
- Bagatte, G. and M.A. Alikaham. 1987. Copper, cadmium and nikel accumulation in clayfish population near copper-nikel smelters at Sudbury, Ontario, Canada. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 38: 540-545.
- 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.
- Chain, B.W., L.Sileo, J.C. Franson and J.Moore. 1983. Effects of dietaly cadmium on mallard duckings. Environ. Res. 32: 286-297.
- Chapman, G.A. 1978. Toxicities on cadmium, copper and zinc to four juvenile stages of Chinook salmon and steelhead. Trans. Am. Fish. Soc. 107(6): 841-847.
- Chen, H. and Cutright, T. 2001. EDTA and HEDTA effects on Cd, Cr, and Ni uptake by *Helianthus annuus*. Chemosphere 45: (2001) pp. 21-28.
- Codex. 2007. Codex General Standard for Contaminants and Toxins Foods, CODEX STAN 193-1995. Codex Alimentarius Commission, pp. 1-46.
- Coleman, J.E. 1992. Zinc proteins : enzymes, storage proteins, transcription factors, and replication proteins. Annu. Rev. Biochem. 61: 897-946.
- Cui, S., Zhou, QX., Wei, S.H., Zhang, W., Cao, L., and Ren, L.P, 2006. Effects of exogenous chelators on phytoavailability and toxicity of Pb in *Zinnia elegans* Jacq. Journal of Hazardous Materials. 146: 341-346.
- Evangelou, M., Beuer, U., Ebel, M. and Schaeffer, A. 2006. The influence of EDDS and EDTA on The uptake of heavy metals of Cd and Cu from soil with tobacco *Nicotiana tabacum*. Chemosphere. 68: 345-353.
- Ginkel, V. C.G., Kester, H., Stroo, C. A. and Haperen, V. A.M. 1999. Biodrgradation of EDTA in pulp and paper mill effluents by activated sludge. Water Science and Technology. 40: 259-266.

- Greman, H., Vodnik, D., Velikonja-Bolta, S. and Lestan, D. 2003. Ethylenediamine disuccinate as a new chelate for environmentally safe enhanced lead phytoextraction. J. Environ. Qual. 32: 500-506.
- Hoffman, D.J., B.A. Rattner, G.A. Bur, Jr. and J. Cairns, Jr. 1995. Handbooks of Ecotoxicology. Lewis Publishers, Boca Raton.
- Jackson, M. L. 1973. Soil Chemical Analysis. 2nd ed. New Delhi: Prentice-Hall.
- Jindasa, K. B. P. N., Milham, P. J., Hawkins, C. A., Cornish, P. S., Williams, P. A., Kaldos, C. J., and Conroy, J. P. 1997. Survey of cadmium levels in vegetables and soil of Greater Sydney, Australia. Journal of Environmental Quality. 26: 924-933.
- Kadlec, R.H. and Knight, R.L. 1996. Treatment Wetland. Boca Raton, FL: Lewis-CRS Press.
- Lai, H. Y. and Chen, Z. S. 2003. Effects of EDTA on solubility of cadmium, zinc, and lead and their uptake by rainbow pink and vetiver grass. Chemospher. 55: 421-430.
- Liphadzi, M.S. and Kirkham, M.B. 2006. Availability and plant uptake of heavy metals in EDTA-assisted phytoremediation of soil and composted biosolids. South African Journal of Botany. 72: 391-397.
- Lombi, E., Zhao, F. J., Dunham, S.J. and McGrath, S.P. 2001. Phytoremediation of heavy metal-contaminated soil: Natural Hyperaccumulation versus chemically enhanced phytoextraction. Journal of Environmental Quality. 30: 1919-1926.
- Luo, C., Shen, Z. and Li, X. 2004. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS. Chemospher. 59: 1-11.
- Nascimento, D., Amarasiriwardena and Xing, B. 2006. Comparison of natural organic acids and synthetic chelates at enhancing phytoextraction of metals from a multi-metal contaminated soil, Environ. Pollut. 140: 114-123.
- Nriagu, J.O. 1980. Cadmium in the Environment, Part I; Ecological Cycling Environmental Science and Technology Series. Wiley Interscience Publ., New York. 525 p.
- 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.

- Sampanpanish, P., Pongsapich, W., Khaodhiar, S. and Khan, E. 2006. Chromium removal from Soil by Phytoremediation with Weed Plant Species in Thailand. In *Water, Air and Soil Focus*. Springer Netherlands. 6(1-2): 191-206.
- Santos, F.S., et al. 2006. Chelate-induced phytoextraction of metal polluted soils with *Brachiaria decumbens*. Chemosphere. 65: 43-50.
- 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.
- Siriratpiriya, O.; Vigerust, E. and Selmerolsen, A.R. 1985. Effect of temperature and heavy metal application on metal content in lettuce. Meldinger fra Norges Landbrukshogskole. 64: 1-29.
- Smolinska, B. and Cedzynska, K. 2007. EDTA and urease effects on Hg accumulation by *Lepidium sativum*. Chemospher. 69: 1388-1395
- Suchera Ruangkhum. 2007. Effect of phosphorus in fertilizer on available cadmium and zinc uptake by sugarcane. Master's Thesis, Environmental Management, Graduate School, Chulalongkorn University.
- USEPA. 1996. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. Method. 3052, Washington D.C., USA.
- USEPA. 1998. Microwave assisted acid digestion of aqueous Samples and extracts. Method. 3015A, Washington D.C., USA
- Vered, E. and Rao, V.P. 2007. Crop Growth Phases[Online]. Available from: http://www.sugarcane crops.com/crop_growth_phase/[2010, September 4]
- Weihong, X., Wenyi, L., Jianping, H., Singh, B. and Zhiting, X. 2008. Effects of insoluble Zn, Cd, and EDTA on the growth, activities of antioxidant enzymes and uptake of Zn and Cd in *Vetiveria zizanioides*. Journal of Environmental Sciences. 21: 186-192.
- White, D.H., M.T.Finley and J.F.Ferrell. 1978. Histopathologic of dietary cadmium on kidneys and tests of mallard ducks. J. Toxicol. Environ. Health. 4: 551-558.
- Wren, C.D., H.R.MacCrimmon and B.R.Loeschler. 1983. Examination of bioaccumulation and biomagnifications of metal in a Precambrian Shield lake. Water, Air and Soil pollut. 19: 227-291.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สูตรการคำนวณหาปริมาณสาร

1. การคำนวณหาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในรูปที่พืชสามารถดูดตั้งได้

กำหนดให้	S	คือ	น้ำหนักดิน (กรัม)
	V	คือ	ปริมาตรน้ำยาสกัด (มิลลิลิตร)
	C	คือ	ค่าของแคดเมียมหรือสังกะสีที่วัดได้จากเครื่อง AAS (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	B	คือ	ค่า Blank (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ดังนั้น ปริมาณแคดเมียมที่พืชสามารถดูดตั้งได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เท่ากับ

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

2. การหาความหนาแน่นของน้ำอ้อย

เมื่อ	W	=	น้ำหนักของน้ำอ้อย 1 กรัม
	V	=	ปริมาตรของน้ำอ้อย 1 มิลลิลิตร หรือ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ดังนั้น ความหนาแน่นของน้ำอ้อย = $\frac{W}{V}$
 มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3)

3. การคำนวณสารคิเลต

จากสูตร	N_1V_1	=	N_2V_2
เมื่อ	N_1	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้น
	V_1	คือ	ปริมาตรสารละลายเข้มข้นตั้งต้น
	N_2	คือ	ความเข้มข้นของสารละลายในดิน
	V_2	คือ	ปริมาตรของสารละลายที่ต้องการเตรียม

4. การคำนวณค่าใช้จ่าย

กำหนดให้ ความลึกของดินบน (Top Soil) อยู่ระหว่าง 0-30 เซนติเมตร
(คำนวณความลึกของดินบนที่ 17 เซนติเมตร)
ความหนาแน่นของดิน เท่ากับ 1.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
1 ไร่ เท่ากับ 1,600 ตารางเมตร

ดังนั้น ปริมาณดิน 1 ไร่ (กิโลกรัม)

$$\begin{aligned} \text{ดิน 1 ไร่} &= 1,600 \text{ m}^2 \times 1.3 \times 100^3 \text{ g/m}^3 \times 0.17 \text{ m} \\ &= 353,600 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

สาร EDTA ที่ใส่ลงในดินมีความเข้มข้น เท่ากับ 1 มิลลิโมลต่อ 1 กิโลกรัมดิน

ในการทดลองใช้สาร EDTA ในรูป Na_2EDTA เป็นรูปที่ละลายน้ำได้

Na_2EDTA 1 มิลลิโมลต่อ 1 กิโลกรัมดิน เท่ากับ 372.24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ดิน 1 ไร่} \quad \text{จะต้องใช้สาร EDTA} &= 353,600 \text{ กก.} \times 372.24 \text{ มก./กก.} \\ &= 132 \text{ กิโลกรัม} \end{aligned}$$

แหล่งที่มา: <http://vdo.kku.ac.th/mediacenter/mediacenter-uploads/libs/html/1291/inde.html>

4.1 สาร EDTA ในเกรด Analytical Reagent; (A.R.) ประสิทธิภาพ 99 %

$$\begin{aligned} \text{สาร EDTA 0.5 กิโลกรัม ราคา} &= 720 \text{ บาท} \\ \text{สาร EDTA 11 กิโลกรัม ราคา} &= \frac{132 \times 720}{0.5} \text{ บาท} \\ &= 190,080 \text{ บาท} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น ต้นทุนในการบำบัดต่อไร่ ของการใช้สาร EDTA เกรด Analytical Reagent มีค่าเท่ากับ 190,080 บาท

4.2 สาร EDTA ในเกรด Commercial ประสิทธิภาพ 90 %

สาร EDTA 1 กิโลกรัม ราคา	=	150	บาท
สาร EDTA 11 กิโลกรัม ราคา	=	$\frac{132 \times 150}{1}$	บาท
	=	19,800	บาท

เพราะฉะนั้น ต้นทุนในการบำบัดต่อไร่ ของการใช้สาร EDTA เกรด Commercial มีค่าเท่ากับ 19,800 บาท



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การเตรียมสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

การเตรียมน้ำยาสกัด DTPA

- 1.1 ชั่งน้ำหนัก DTPA จำนวน 1.967 กรัม TEA จำนวน 14.92 กรัม และ $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 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 ช่วยลดการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ในดินที่เป็นด่างจัด

หมายเหตุ

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

ภาคผนวก ค

ปริมาณแคดเมียม และสังกะสีในดิน อ้อย และน้ำชะ

ตารางที่ ค1 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในดิน

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	121.08		112.32		106.23		104.79	
	116.41	119.97	120.81	115.75	107.15	108.19	97.24	102.36
	122.41		114.11		111.18		105.06	
EDTA 0.5 mM	117.17		116.70		112.77		100.41	
	118.49	117.02	111.22	112.08	103.78	107.27	98.72	102.05
	115.39		108.33		105.27		107.01	
EDTA 1.0 mM	116.20		99.11		97.13		97.26	
	119.97	115.82	108.06	104.85	102.17	100.05	100.03	96.08
	111.29		107.38		100.85		90.96	
EDTA 2.0 mM	116.94		107.07		99.87		98.33	
	113.97	116.17	113.26	107.73	103.67	102.55	93.75	98.34
	117.60		102.87		104.11		102.96	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค2 ปริมาณแคดเมียมในดินที่พืชดูดตั้งได้ (Available)

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	27.51		26.71		28.39		24.40	
	28.78	27.81	28.35	27.68	25.45	26.36	26.25	26.25
	27.16		27.98		25.25		28.10	
EDTA	29.00		29.72		27.77		27.93	
0.5 mM	29.56	29.31	28.00	28.63	28.63	27.50	26.67	27.35
	29.37		28.18		26.11		27.45	
EDTA	29.18		29.18		28.35		28.34	
1.0 mM	30.97	30.11	27.97	28.78	27.08	27.76	25.44	27.56
	30.18		29.18		27.85		28.91	
EDTA	30.37		29.01		27.65		26.88	
2.0 mM	30.91	30.34	27.59	28.58	26.70	27.45	24.78	27.07
	29.74		29.13		27.99		29.54	

ตารางที่ ค3 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนใบอ้อย

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนใบอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	5.00		7.73		6.39		4.93	
	4.90	4.83	8.64	7.21	7.17	6.30	2.49	4.18
	4.60		5.26		5.34		5.11	
EDTA 0.5 mM	6.26		8.61		8.40		4.54	
	4.99	6.07	8.36	8.24	7.44	7.92	7.50	5.74
	6.96		7.75		7.91		5.17	
EDTA 1.0 mM	8.46		12.23		11.21		7.41	
	6.97	7.28	12.83	12.45	11.07	10.81	6.49	7.31
	6.43		12.29		10.15		8.03	
EDTA 2.0 mM	6.49		11.53		8.91		6.61	
	7.95	7.12	10.36	11.16	8.41	8.67	6.20	6.64
	6.91		11.59		8.68		7.11	

ตารางที่ ค4 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนชานอ้อย

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนชานอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	3.44		9.34		8.92		6.60	
	6.07	4.95	8.48	9.71	9.28	8.14	6.75	7.42
	5.35		11.30		6.23		8.92	
EDTA	5.47		11.23		8.71		8.99	
0.5 mM	7.49	6.12	9.47	10.40	9.11	9.37	7.40	8.24
	5.40		10.48		10.30		8.33	
	EDTA	7.60		14.51		13.28		10.15
1.0 mM	6.48	7.84	13.92	14.13	11.04	11.76	11.06	11.00
	9.44		13.97		10.97		11.78	
	EDTA	6.91		13.52		10.67		11.69
2.0 mM	7.95	7.12	10.36	11.16	8.41	8.67	6.20	6.64
	6.91		11.59		8.68		7.11	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค5 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนท่อนพันธุ์เดิม

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนท่อนพันธุ์เดิม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	7.93		7.06		14.57		8.27	
	8.88	7.83	13.28	8.22	10.77	11.07	5.80	7.04
	6.69		4.31		7.87		7.06	
EDTA 0.5 mM	9.72		13.17		11.59		9.60	
	8.15	8.97	8.93	10.96	14.88	11.59	4.80	7.68
	9.05		10.79		8.30		8.64	
EDTA 1.0 mM	9.90		11.39		19.43		13.92	
	11.94	11.78	13.50	12.26	16.78	16.76	7.34	9.36
	13.49		11.89		14.06		6.83	
EDTA 2.0 mM	12.46		14.02		17.40		7.64	
	8.98	9.45	12.54	11.66	14.72	15.76	10.23	8.72
	6.91		11.59		8.68		7.11	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค6 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนรากข้าว

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนรากข้าว (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	19.00		47.04		53.48		42.94	
	18.63	19.32	43.54	41.76	46.22	49.09	34.21	36.57
	20.33		34.71		47.58		32.55	
EDTA 0.5 mM	16.90		46.18		49.11		36.50	
	16.94	19.93	41.39	42.19	45.69	50.65	39.65	38.93
	25.96		39.00		57.13		40.62	
EDTA 1.0 mM	21.97		49.70		57.74		40.48	
	19.99	21.87	39.91	44.68	64.04	57.52	45.58	41.97
	23.64		44.42		50.78		39.86	
EDTA 2.0 mM	25.84		41.94		59.21		37.74	
	19.97	22.27	43.09	43.26	57.76	55.27	45.98	40.64
	20.99		44.76		48.85		38.20	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค7 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนน้ำอ้อย

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในส่วนน้ำอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	0.00		0.00		0.21		0.28	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.15	0.11	0.18
	0.00		0.00		0.09		0.14	
EDTA 0.5 mM	0.00		0.00		0.16		0.22	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.15	0.14	0.20
	0.00		0.00		0.11		0.23	
EDTA 1.0 mM	0.00		0.00		0.13		0.13	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.16	0.34	0.23
	0.00		0.00		0.13		0.20	
EDTA 2.0 mM	0.00		0.00		0.14		0.32	
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.16	0.20	0.23
	0.00		0.00		0.20		0.18	

หมายเหตุ ความหนาแน่นของน้ำอ้อยเท่ากับ 1.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ ค8 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำชะ

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียมในน้ำชะ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	0.13		0.20		0.15		0.30	
	0.09	0.14	0.16	0.18	0.21	0.23	0.20	0.27
	0.19		0.17		0.33		0.31	
EDTA 0.5 mM	0.09		0.13		0.28		0.40	
	0.14	0.14	0.21	0.18	0.21	0.24	0.26	0.29
	0.20		0.20		0.24		0.20	
EDTA 1.0 mM	0.16		0.21		0.26		0.29	
	0.12	0.16	0.14	0.20	0.33	0.28	0.31	0.30
	0.20		0.24		0.23		0.32	
EDTA 2.0 mM	0.17		0.20		0.25		0.37	
	0.12	0.17	0.25	0.22	0.30	0.28	0.36	0.37
	0.21		0.21		0.29		0.39	

ตารางที่ ค9 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในดิน

ชุดการทดลอง	ปริมาณสังกะสีในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	4,047.00		3,726.58		3,693.96		3,264.43	
	3,944.40	3,864.28	3,456.95	3,729.50	3,147.55	3,359.64	2,946.04	3,200.76
	3,601.42		4,004.97		3,237.41		3,391.80	
EDTA	3,649.93		3,415.76		3,217.83		3,243.52	
0.5 mM	4,115.78	3,828.54	3,862.63	3,677.70	3570.78	3,297.02	3,332.14	3,116.97
	3,719.91		3,754.70		3,102.44		2,775.27	
EDTA	3,724.99		3,754.55		3,237.08		3,231.89	
1.0 mM	3,773.77	3,887.35	3,154.37	3,592.93	3,355.00	3,135.92		3,031.52
	4,163.28		3,869.88		2,815.67		3,091.69	
EDTA	3,517.32		3,892.41		2,608.56		3,101.58	
2.0 mM	3,929.17	3,880.53	3,765.48	3,729.52	3,240.26	3,023.01	3,199.02	3,005.63
	4,195.09		3,530.66		3,220.21		2,716.29	

ตารางที่ ค10 ปริมาณสังกะสีในดินที่พืชดูดตั้งได้ (Available)

ชุดการทดลอง	ปริมาณสังกะสีในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	76.22		72.66		56.44		61.65	
	73.82	78.02	74.93	74.21	55.69	61.84	36.35	56.14
	84.03		75.03		73.39		70.43	
EDTA	91.51		66.52		73.13		73.47	
0.5 mM	76.54	81.77	86.27	77.67	62.16	63.00	54.09	61.68
	77.26		80.22		53.72		57.47	
EDTA	90.93		84.93		67.38		68.35	
1.0 mM	68.59	85.25	76.80	78.87	66.86	64.45	47.08	61.10
	96.24		74.87		59.11		67.85	
EDTA	108.88		105.22		64.95		49.65	
2.0 mM	88.64	102.05	101.58	99.50	66.44	68.35	71.70	63.11
	108.63		91.69		73.66		67.99	

ตารางที่ ค11 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนใบอ้อย

ชุดการทดลอง	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนใบอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	52.49		34.20		33.86		35.26	
	70.02	62.11	33.96	34.67	26.17	28.98	24.50	25.35
	63.83		35.86		26.91		16.30	
EDTA	75.00		36.31		34.56		22.99	
0.5 mM	49.30	66.20	37.71	35.65	23.85	29.83	25.55	25.67
	74.29		32.94		31.07		28.47	
EDTA	94.85		56.71		44.00		37.94	
1.0 mM	75.98	79.66	37.61	41.00	32.47	39.39	27.98	33.04
	68.15		28.67		41.68		33.20	
EDTA	95.21		37.69		36.26		29.67	
2.0 mM	85.95	87.18	36.94	36.65	35.71	35.09	25.73	26.67
	80.38		35.31		33.29		24.61	

ตารางที่ ค12 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนชานอ้อย

ชุดการทดลอง	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนชานอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	119.29		83.75		89.86		53.06	
	86.87	111.58	63.81	73.33	58.59	71.86	50.11	54.48
	128.56		72.42		67.12		60.26	
EDTA	297.03		127.52		85.60		54.68	
0.5 mM	258.34	281.30	115.13	107.63	73.78	77.08	55.10	58.97
	288.52		80.23		71.85		67.14	
	EDTA	291.03		145.81		131.88		104.59
1.0 mM	343.63	320.00	104.01	130.14	111.08	112.24	87.74	90.36
	325.34		140.61		93.74		78.74	
	EDTA	402.64		165.98		144.37		62.01
2.0 mM	344.31	378.16	134.84	144.78	95.65	115.70	71.80	65.90
	387.54		133.53		107.07		63.90	

ตารางที่ ค13 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนท่อนพันธุ์เดิม

ชุดการทดลอง	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนท่อนพันธุ์เดิม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	87.19		125.71		74.53		71.30	
	113.81	101.74	108.22	114.40	60.90	68.74	51.26	58.45
	104.21		109.26		70.79		52.78	
EDTA 0.5 mM	93.29		136.04		77.51		61.59	
	105.72	101.84	111.08	116.06	82.94	77.80	57.70	68.30
	106.51		101.04		72.93		85.62	
EDTA 1.0 mM	114.92		105.97		96.57		75.34	
	107.62	104.18	138.03	125.00	84.00	84.13	62.40	68.59
	90.02		130.99		71.83		68.03	
EDTA 2.0 mM	124.74		163.91		76.07		71.09	
	126.22	130.21	136.28	151.12	108.65	89.27	58.70	69.95
	139.67		153.18		83.10		80.07	

ตารางที่ ค14 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนรากอ้อย

ชุดการทดลอง	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนรากอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	775.00		979.21		667.78		420.20	
	625.57	757.75	1,084.00	1,003.62	819.02	703.63	430.74	399.19
	872.67		947.65		624.07		346.64	
EDTA	766.00		1,131.46		818.95		462.60	
0.5 mM	672.71	772.59	1,026.11	1,069.34	614.44	740.24	358.75	444.34
	879.05		1,050.45		787.35		511.67	
	EDTA	834.11		1,111.33		785.21		468.04
1.0 mM	791.11	798.77	1,225.39	1,165.75	794.89	748.10	443.32	481.90
	771.08		1,160.52		664.19		534.34	
	EDTA	870.26		1,075.86		666.40		551.74
2.0 mM	983.83	849.56	1,193.02	1,169.98	644.91	762.15	543.86	538.33
	694.58		1,241.07		975.15		519.40	

ตารางที่ ค15 ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนน้ำอ้อย

ชุดการทดลอง	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในส่วนน้ำอ้อย (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	0.00		0.00		10.79		12.30	
	0.00	0.00	0.00	0.00	9.32	10.91	12.10	12.09
	0.00		0.00		12.63		11.88	
EDTA 0.5 mM	0.00		0.00		10.93		9.36	
	0.00	0.00	0.00	0.00	11.66	11.02	18.71	12.47
	0.00		0.00		10.46		9.33	
EDTA 1.0 mM	0.00		0.00		13.20		15.14	
	0.00	0.00	0.00	0.00	12.28	11.77	13.64	12.60
	0.00		0.00		9.82		9.01	
EDTA 2.0 mM	0.00		0.00		9.21		15.55	
	0.00	0.00	0.00	0.00	12.88	12.24	12.84	12.88
	0.00		0.00		14.63		10.24	

หมายเหตุ ความหนาแน่นของน้ำอ้อยเท่ากับ 1.05 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค16 ปริมาณการสะสมสังกะสีในน้ำชะ

ชุดการทดลอง	ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในน้ำชะ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)							
	2 เดือน	เฉลี่ย	4 เดือน	เฉลี่ย	6 เดือน	เฉลี่ย	8 เดือน	เฉลี่ย
Control	0.53		0.66		0.65		1.81	
	0.60	0.73	0.17	0.81	0.89	1.40	1.86	1.76
	1.04		1.59		2.67		1.63	
EDTA	0.72		1.29		1.97		3.04	
0.5 mM	1.08	0.75	0.92	0.83	1.61	1.36	1.27	1.72
	0.46		0.27		0.49		0.84	
	EDTA	0.49		1.12		1.43		2.10
1.0 mM	0.70	0.78	0.36	0.83	0.70	1.38	2.30	1.93
	1.14		1.02		2.00		1.39	
	EDTA	1.40		1.31		1.74		1.18
2.0 mM	0.82	1.17	1.19	1.25	1.19	1.62	1.79	2.00
	1.30		1.26		1.93		3.03	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

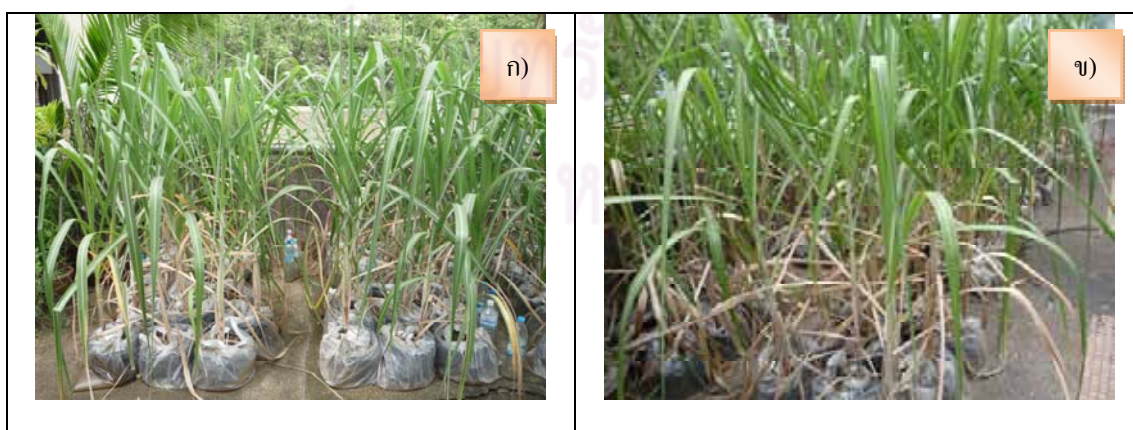
ภาคผนวก ง



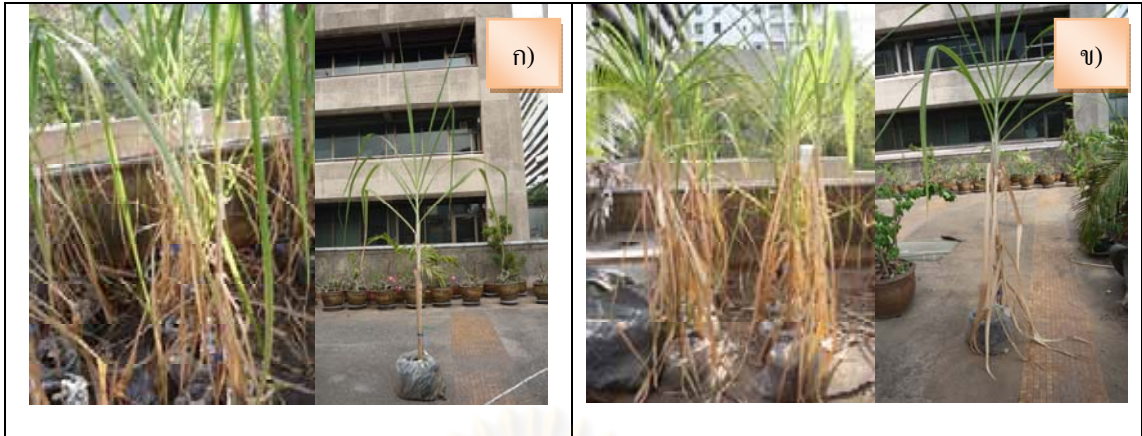
รูปที่ 1 ก) การเตรียมดิน และ ข) การเตรียมภาชนะปลูก



รูปที่ 2 ก) การเตรียมพืชทดลอง และ ข) การปลูกพืชลงในภาชนะปลูก



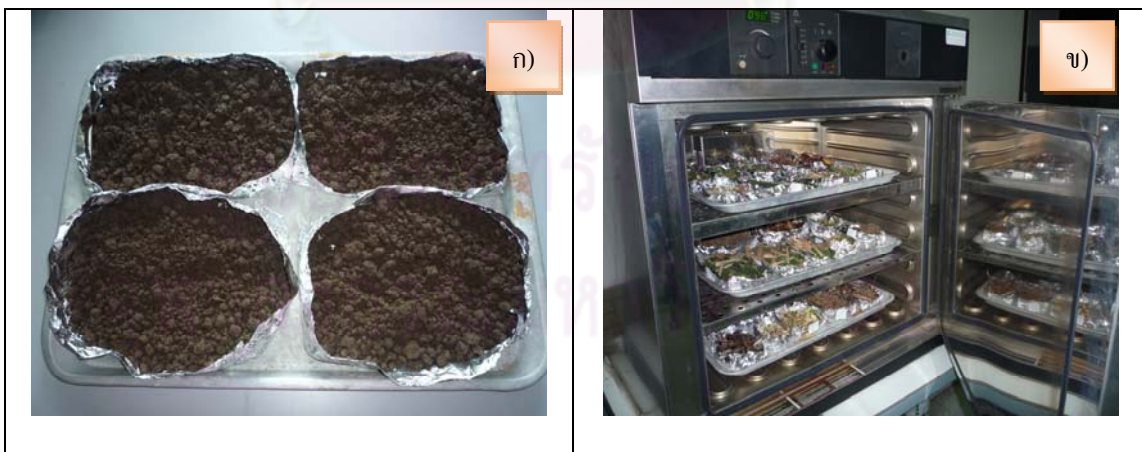
รูปที่ 3 ก) การเจริญเติบโตของอ้อยที่ 2 เดือน และ ข) การเจริญเติบโตของอ้อยที่ 4 เดือน



รูปที่ 4 ก) การเจริญเติบโตของอ้อยที่ 6 เดือน และ ข) การเจริญเติบโตของอ้อยที่ 8 เดือน



รูปที่ 5 การเก็บตัวอย่างอ้อย และการแยกส่วนของอ้อย



รูปที่ 6 ก) การอบตัวอย่างดิน และ ข) การอบตัวอย่างพีท

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณัฐกาญจน์ ตันติธีระศักดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 6 เมษายน พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะทรัพยากร และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2548 และได้ทำงานที่ เทศบาลตำบล บ้านสิงห์ อำเภอโพธาราม จังหวัดราชบุรี ในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิชาการสุขาภิบาล เป็นระยะเวลา 1 ปี หลังจากนั้น ได้เข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 ในระหว่างการศึกษ ได้เข้าร่วมเสนอผลงานวิจัย ในการประชุมวิชาการระดับชาติ โดยได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน ดังต่อไปนี้

ณัฐกาญจน์ ตันติธีระศักดิ์ และ พันธวิศ สัมพันธ์พานิช. “ผลของ EDTA ต่อการดูดซับแคดเมียม ของ อ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน.” หนังสือประมวลผลการประชุมทางวิชาการ (Proceeding) ในการประชุม “แม่ฟ้าหลวงวิชาการ ประจำปี พ.ศ. 2553 : 12 ปีตามรอยสมเด็จพระเจ้า” จัดโดย ส่วนบริการงานวิจัย มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ณ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง จังหวัด เชียงราย วันที่ 19-20 พฤศจิกายน 2553.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย