

กลไกการติดตั้งแคดเมียมจากน้ำเสียโดยหญ้าเนเปียร์แคระ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

CADMIUM UPTAKE MECHANISM FROM CONTAMINATED WASTEWATER BY *Pennisetum
purpureum* CV. MOTT



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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กลไกการดูดซับแคดเมียมจากน้ำเสียโดยหญ้าเนเปียร์แคระ
โดย	นายเอกชา ตนานนท์ชัย
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญรติ จันทร์ภิววัฒน์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

.....	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนุญ หนูจักร)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญรติ จันทร์ภิววัฒน์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม)	
.....	กรรมการ
(อาจารย์ ดร.กัลยา สุนทรวงศ์สกุล)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สมชาย ตันชรากรณ์)	

เอกชา ตานานนท์ชัย : กลไกการดูดซับแคดเมียมจากน้ำเสียโดยหญ้าเนเปียร์แคระ. (

CADMIUM UPTAKE MECHANISM FROM CONTAMINATED WASTEWATER BY *Pennisetum*

purpureum CV. MOTT) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ.ดร.พันธวัช สัมพันธ์พานิช, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.

เพ็ญรดี จันทร์ภักดิ์

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาผลของการเติมสารอินทรีย์ต่อการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ โดยทำการศึกษาหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมและสารอินทรีย์ที่เอ ที่ระดับความเข้มข้น 20, 40, 60, 80, และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราส่วนโมลระหว่างแคดเมียมและสารอินทรีย์ที่เอ ในอัตราส่วน 1:0.5, 1:1, และ 1:2 โมล ที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ดี มีการแสดงความเป็นพิษต่ำ และมีการสะสมแคดเมียมได้ในปริมาณมาก ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 15 วัน เป็นระยะเวลา 45 วัน จากการศึกษาพบว่า แคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราส่วนโมลระหว่างแคดเมียมและสารอินทรีย์ที่เอที่ 1:2 โมลมีความเหมาะสมที่สุดกล่าวคือ พืชทดลองสามารถเจริญเติบโตได้ดี มีการแสดงความเป็นพิษต่ำ และมีการดูดซับแคดเมียมได้ในปริมาณมาก สำหรับการศึกษากลไกการสะสมแคดเมียมในพืช จากการทดลองเปรียบเทียบชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตรร่วมกับสารอินทรีย์ที่เอในอัตราส่วน 1:2 โมล และทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 7 วัน เป็นเวลา 105 วัน จากการศึกษาวิเคราะห์หาปริมาณการสะสมแคดเมียมในพืช พบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองหญ้าเนเปียร์แคระมีการสะสมแคดเมียมสูงสุดเท่ากับ 1,016.29 มิลลิกรัม โดยสะสมที่ส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) เท่ากับ 683.70 และ 333.69 มิลลิกรัมต่อต้น ตามลำดับ จากนั้นนำพืชที่มีการสะสมแคดเมียมสูงสุด อีกส่วนที่เตรียมไว้ มาทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ ด้วยเครื่องเลเซอร์อะตอมอินดักทีฟฟลูออเรสเซนซ์ (LA-ICP-MS) และลำแสงซินโครตรอนเทคนิคไมโครเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (SR-XRF) พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีการสะสมแคดเมียมสูงบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอก และท่อลำเลียงอาหาร ทั้งนี้การเติมสารอินทรีย์ที่เอ ส่งผลให้มีการดูดซับแคดเมียมและเคลื่อนที่ไปสะสมในเนื้อเยื่อชั้นในเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า แคดเมียมมีการสะสมบริเวณส่วนใต้น้ำของหญ้าเนเปียร์แคระเป็นส่วนมาก โดยผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงปริมาณที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์ (AAS) จึงสามารถระบุได้ว่า มีการสะสมแคดเมียมบริเวณส่วนใต้น้ำของหญ้าเนเปียร์แคระสูงสุด โดยเฉพาะชุดการทดลองที่มีการเติมสารอินทรีย์ที่เอ นอกจากนี้มีการศึกษาปัจจัยของสารอินทรีย์ที่เอ ต่อการเปลี่ยนฟอรัมของแคดเมียมในพืชร่วมด้วย โดยการใช้ลำแสงซินโครตรอนเทคนิคเอ็กซ์เรย์แอบซอร์บชันสเปกโตรสโกปี (SR-XAS) ผลการศึกษาพบว่า เติมสารอินทรีย์ที่เอไม่ได้ทำให้แคดเมียมเปลี่ยนฟอรัมแต่อย่างใด จึงสามารถสรุปได้ว่าสารอินทรีย์ที่เอมีความเหมาะสมในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระได้ดีที่สุด

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5687828720 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: PHYTOREMEDIATION, MOTT DWARF NAPIER GRASS, CADMIUM, DISTRIBUTION, FORMATION

Aekkacha

Tananonchai

:

CADMIUM UPTAKE MECHANISM FROM CONTAMINATED WASTEWATER BY *Pennisetum purpureum* CV . MOTT. Advisor: Assoc.Prof.Dr. PANTAWAT SAMPANPANISH Co-advisor: Asst.Prof.Dr. PENRADEE CHANPIWAT

This study aims to study the influence of adding Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) on the accumulation, movement and distribution of cadmium (Cd) in *Pennisetum purpureum* CV. Mott (dwarf elephant grass). The experimental conditions to find out the optimum condition for plant growth with low toxicity and high Cd accumulation are including Cd concentrations of 20, 40, 60, 80, and 100 mg/L, and the molarity between Cd and EDTA of 1:0.5, 1:1, and 1:2 mol. Plant samples were collected every 15 days over a period of 45 days. The result showed that the condition of 40 mg/L of Cd and 1:2 of Cd and EDTA molarity ratio was the most appropriate treatment condition as it gave an effective plant growth with high Cd accumulation and low toxicity of Cd to plant. For the study of Cd accumulation, total Cd concentration in plant growing in the 40 mg/L of Cd and 1:2 Cd:EDTA solution was compared to that of plant growing in the solution with only 40 mg/L of Cd. In this Cd accumulation study, plant samples were collected every 7 days over a period of 105 days. The highest Cd accumulation in dwarf elephant grass at the end of the experiment was 1,017.39 mg/plant. Cd accumulation in the underground parts (roots) and aboveground parts (stems and leaves) was 683.70 and 333.69 mg/plant, respectively. In addition, another portion of plant sample with highest Cd accumulation was qualitatively analyzed by the Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) and Synchrotron radiation x-ray fluorescence spectroscopy (SR-XRF). The results showed that dwarf elephant grass mainly accumulates Cd in the underground parts (roots), especially in the experimental set with Cd:EDTA molarity ratio of 1:2 mol and treatment time of 105 days. Therefore, it can be concluded that EDTA can effectively enhance the remediation of Cd from the root system and endodermis of the grass. The analysis of Cd formation in plant tissue and cells by the Synchrotron radiation X-ray absorption spectroscopy (SR-XAS) strongly indicated that the addition of EDTA to the solution had no effect on the change of Cd formation. Therefore, it is possible to conclude that EDTA addition can enhance the uptake of Cd by dwarf.napier grass

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณา ความช่วยเหลือ ความอนุเคราะห์จากบุคคลผู้มีพระคุณหลายๆ ท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้กรุณาให้ความรู้ ให้ความเมตตาในการชี้แนะและแนวทางในการแก้ไขปัญหาระหว่างการศึกษาระดับมหาบัณฑิต ถึงระดับดุษฎีบัณฑิต รวมถึงการให้แรงบันดาลใจในการศึกษาในระดับดุษฎีบัณฑิต ให้คำปรึกษาแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ และช่วยเหลือเพื่อขอยุติไปทำการวิจัยในต่างประเทศ อันเป็นการลดข้อจำกัดและเพิ่มประสิทธิภาพต่อการทำวิทยานิพนธ์ และให้ความอนุเคราะห์ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญฤดี จันทร์ภักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณ ดร.สมชาย ต้นชรากรณ์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่ง รวมทั้งกรุณาให้คำชี้แนะรวมถึงการติดต่อประสานงานเพื่อขอไปทำการวิจัย ณ ประเทศไต้หวัน ขอกราบขอบพระคุณ Dr. Gwo-Huei Luo, Dr. Mau-Tsu Tang และ Dr. Chih-Wen Pao ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในการทำวิจัย และการดำรงชีวิตระหว่างทำการวิจัยที่ประเทศไต้หวัน เพื่อเป็นข้อมูลประกอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม และ อาจารย์ ดร.กัลยา สุนทรวงศ์สกุล ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้การแนะนำและข้อเสนอแนะให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ระดับดุษฎีบัณฑิต หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ที่สนับสนุนทุนบางส่วนในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) สำหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัยด้านการจัดการสารพิษในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ขอขอบคุณ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนหน่วยปฏิบัติการวิจัยด้านการจัดการเหมืองสีเขียว ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ในการทดลอง ขอกราบขอบพระคุณ โครงการทุน Lightsources for Africa, the Americas, Asia and Middle East Project (LAAAMP) ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยที่ประเทศไต้หวัน ขอกราบขอบพระคุณ National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC) ประเทศไต้หวัน และสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมาที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือ วิเคราะห์ในการทดลอง สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ วีระชัย คุณแม่สุลีสี ตนานนท์ชัย คุณย่าปทุมณา ธาดาสิทธิเวท คุณยายสุจิต วัชรเวชศฤงคาร และบุคคลในครอบครัวที่ให้ความสำคัญและทุนสนับสนุนการศึกษาในครั้งนี้

เอกชา ตนานนท์ชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 สมมุติฐาน	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แคดเมียม (cadmium, Cd).....	5
2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของแคดเมียม	5
2.1.2 แคดเมียมในสิ่งแวดล้อม	6
2.1.3 ความเป็นพิษของแคดเมียม	7
2.1.4 ค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม	7
2.1.5 ปฏิกิริยาเคมีของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม.....	7
2.1.6 กลไกการสะสมแคดเมียมในพืช.....	9
2.1.7 การแสดงความเป็นพิษของแคดเมียมในพืช.....	11

2.2 การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช (phytoremediation).....	12
2.2.1 ประเภทของการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช	13
2.2.2 ศักยภาพของพืชในการดูดซับโลหะหนัก (phytoavailability).....	17
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่และการสะสมทางชีวภาพของโลหะหนัก.....	19
2.2.4 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลหะและองค์ประกอบอื่นๆ.....	21
2.2.5 ข้อดีและข้อจำกัดการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช	22
2.3 หญ้าเนเปียร์ (<i>Pennisetum purpureum</i> C.V. mott)	23
2.3.1 ลักษณะทางกายภาพ.....	24
2.3.2 การขยายพันธุ์.....	24
2.3.3 การใช้หญ้าเนเปียร์กับการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก	25
2.4 การปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics).....	26
2.4.1 ประเภทของการปลูกพืชไร้ดิน.....	26
2.4.2 ข้อดีและข้อจำกัดของการปลูกพืชไร้ดิน	27
2.4.2 การประยุกต์ใช้วิธีการปลูกพืชไร้ดินร่วมกับวิธีการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยพืช	28
2.5 สารคีเลต (Chelating agent).....	29
2.5.1 ประเภทของสารคีเลต	29
2.5.2 สารคีเลตต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมแคดเมียมในพืช	30
2.5.3 ปัจจัยในการเลือกใช้สารคีเลต	31
2.5.4 เอทิลีนไดเอทิลเอมีนเตตระอะซิติก.....	31
2.6 การศึกษาการกระจายตัวของแคดเมียมในพืช.....	35
2.6.1 แสงซินโครตรอน	35
2.6.2 การทำงานของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน	35
2.6.3 การใช้แสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์	37
2.6.4 การใช้เลเซอร์อะบเลชันอินดักทีฟพลาสมาสเปกโทรเมทรี	39

2.7 การศึกษารูปของแคดเมียมที่สะสมในพืช.....	40
2.7.1 การใช้แสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคเอกซเรย์แอบซอร์บชันสเปกโตรสโกปี.....	40
2.7.2 การศึกษารูปฟอร์มของโลหะหนักในพืช.....	41
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
2.8.1 งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้พืชในการดูดซับและสะสมแคดเมียม.....	42
2.8.2 งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้หญ้าเนเปียร์ในการบำบัดสารโลหะหนัก.....	43
2.8.3 งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนในการบำบัดสารโลหะหนัก.....	44
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	46
3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี.....	46
3.1.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ สำหรับโรงเรือนทดลอง.....	46
3.1.2 อุปกรณ์ เครื่องมือ สำหรับเก็บตัวอย่างพืชและน้ำ.....	46
3.1.3 อุปกรณ์ เครื่องมือ สำหรับการทดลอง.....	46
3.1.4 สารเคมี.....	48
3.2 สถานที่วิจัย.....	48
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	48
3.3.1 การเตรียมการทดลอง.....	48
3.3.2 การศึกษาเบื้องต้น (ดังภาคผนวก ก5).....	49
3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	51
3.3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	52
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์การทดลอง.....	53
4.1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อศึกษาความทนทาน การแสดงความเป็นพิษ และการเจริญเติบโต สัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคะที่มีต่อสารละลายแคดเมียม สารละลายอีดีทีเอ และสารละลาย ผสมระหว่างแคดเมียมและอีดีทีเอ.....	53
4.1.1 ผลของแคดเมียมต่อลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสีย.....	53

4.1.2	ผลของแคดเมียมต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์และการแสดงความเป็นพิษต่อพืช .	57
4.1.3	การดูดตั้งและสะสมแคดเมียมในพืชทดลอง	58
4.1.4	ผลของสารอีดีทีเอต่อลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสีย	61
4.1.5	ผลของสารอีดีทีเอต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์และการแสดงความเป็นพิษต่อพืช	64
4.1.6	ผลของการเติมสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสารอีดีทีเอต่อลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำเสีย	65
4.1.7	ผลของสารละลายผสมระหว่างแคดเมียม และสารละลายอีดีทีเอ ต่ออัตราการเจริญเติบโต สัมพัทธ์ และการแสดงความเป็นพิษต่อพืช	67
4.1.8	ผลของสารละลายผสมระหว่างแคดเมียม และสารละลายอีดีทีเอ ต่อการดูดตั้ง และ สะสมแคดเมียมในพืช	69
4.2	กลไกการสะสม การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ	71
4.2.1	ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำที่มีการเติมสารละลายผสมระหว่างแคดเมียม และสารละลายอีดีทีเอ	71
4.2.2	ผลของสารแคดเมียม และอีดีทีเอ ต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ และการแสดงควา มเป็นพิษต่อพืช.....	75
4.2.3	ศักยภาพของสารอีดีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในพืช	77
4.2.4	ประสิทธิภาพในการดูดตั้ง และสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ.....	78
4.2.4	การกระจายตัวของแคดเมียมในพืช.....	80
4.2.5	รูปฟอร์มของแคดเมียมและสารอีดีทีเอในหญ้าเนเปียร์แคระ.....	89
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	90
5.1	สรุปผลการทดลอง	90
5.1.1	การศึกษาความทนทาน การแสดงความเป็นพิษ และการเจริญเติบโตสัมพัทธ์	90
5.1.2	กลไกการสะสม การเคลื่อนที่ การกระจายตัว และรูปฟอร์มของแคดเมียมในหญ ้าเนเปียร์แคระ.....	91
5.2	ข้อเสนอแนะ	92

ภาคผนวก.....	93
ภาคผนวก ก สถานที่ดำเนินการทดลอง	94
ภาคผนวก ข วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	100
ภาคผนวก ค การแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคะ.....	117
บรรณานุกรม.....	123
ประวัติผู้เขียน.....	137



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
รูปที่ 2.1 กลไกของการดูดตั้งสารโลหะหนักด้วยพืช.....	10
รูปที่ 2.2 กระบวนการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช.....	13
รูปที่ 2.3 ประเภทของการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช (ก) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (ข) การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช (ค) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (ง) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (จ) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช และ (ฉ) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช.....	14
รูปที่ 2.4 ประเภทของการสกัดสารมลพิษ (Phytoextraction).....	16
รูปที่ 2.5 การดูดตั้งสารโลหะหนักในสารละลายด้วยพืช.....	18
รูปที่ 2.6 การดูดตั้งสารโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินด้วยพืช.....	18
รูปที่ 2.7 ผลของความเป็นกรดเป็นด่างต่อประสิทธิภาพของการดูดตั้งสารโลหะหนักในดิน.....	20
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสารโลหะหนักในพืชและสิ่งมีชีวิตที่อยู่ติดกับรากพืช.....	22
รูปที่ 2.9 ลักษณะทางกายภาพของหญ้าเนเปียร์แคระ.....	25
รูปที่ 2.10 การปลูกพืชไร้ดิน (hydroponics).....	27
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของอิตีทีเอ และโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะ และสารอิตีทีเอ.....	32
รูปที่ 2.12 เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน.....	36
รูปที่ 2.13 กลไกการเกิดการเรืองของรังสีเอกซ์.....	37
รูปที่ 4.1 (ก) ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ และ (ข) การแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ.....	58
รูปที่ 4.2 (ก) การสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และ (ข) การสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือหน้า (ลำต้นและใบ).....	59
รูปที่ 4.3 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือหน้า (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ.....	59
รูปที่ 4.4 (ก) ระดับความเข้มข้นของอิตีทีเอต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ และ (ข) การแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ.....	64
รูปที่ 4.5 (ก) ระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสารละลายอิตีทีเอ ต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ และ (ข) การแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ.....	68
รูปที่ 4.6 (ก) ผลของอิตีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และ (ข) ผลของอิตีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือหน้า (ลำต้นและใบ).....	70

รูปที่ 4.7 ผลของการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอิตีทีเอต่อปริมาณการสะสมแคดเมียม ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้น้ำ (ราก) หญ้าเนเปียร์แคระ.....	71
รูปที่ 4.8 (ก) อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ และ (ข) การแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ	76
รูปที่ 4.9 ผลของอิตีทีเอต่อระดับการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ	77
รูปที่ 4.10 อัตราส่วนร้อยละของการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) และปริมาณแคดเมียมน้ำเสียสังเคราะห์ ก) ชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมหรือชุดการทดลองควบคุมและ ข) ชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอิตีทีเอ	79
รูปที่ 4.11 การศึกษาการสะสมธาตุต่างๆ ในหญ้าเนเปียร์แคระโดย (ก) วิธีการใช้ระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิค SR-XRF ส่วนของลำต้นพืช และ (ข) วิธีการใช้เทคนิคพาร์ทิเคิลอินดิวิชเอกซเรย์อิมิชัน (PIXE).....	81
รูปที่ 4.12 การสะสมแคดเมียมในส่วนปลายราก โคนราก โคนลำต้น กลางลำต้น และใบ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ชุดการทดลองที่มีการเติมสารอิตีทีเอร่วมกับแคดเมียม	82
รูปที่ 4.13 การสะสมแคดเมียมในส่วนปลายราก โคนราก โคนลำต้น กลางลำต้น และใบ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียม	83
รูปที่ 4.14 การสะสมแคดเมียมในส่วนรากของหญ้าเนเปียร์แคระ (ก) ชุดการทดลองที่มีการเติมสารอิตีทีเอร่วมกับแคดเมียม (ข) ชุดการทดลองควบคุม.....	86
รูปที่ 4.15 การสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นของหญ้าเนเปียร์แคระ (ก) ชุดการทดลองที่มีการเติมสารอิตีทีเอร่วมกับแคดเมียม (ข) ชุดการทดลองควบคุม.....	87
รูปที่ 4.16 การสะสมแคดเมียมในส่วนใบของหญ้าเนเปียร์แคระ (ก) ชุดการทดลองที่มีการเติมสารอิตีทีเอร่วมกับแคดเมียม (ข) ชุดการทดลองควบคุม.....	88
รูปที่ 4.17 รูปฟอร์มของแคดเมียม 1) ชุดการทดลองที่เติมแคดเมียมร่วมกับสารอิตีทีเอ (ก) ส่วนใต้น้ำ (ราก) และ (ข) ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ, และ 2) ชุดการทดลองควบคุม (ค) ส่วนใต้น้ำ (ราก) และ (ง) ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของแคดเมียมกับสารมาตรฐาน 1) ชุดการทดลองที่เติมแคดเมียมร่วมกับ สารอิตีทีเอ (จ) ส่วนใต้น้ำ (ราก) และ (ฉ) ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ, และ 2) ชุดการทดลองควบคุม (ช) ส่วนใต้น้ำ (ราก) และ (ซ) ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ	90

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแคดเมียม	6
ตารางที่ 2.2 ค่าเกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม	7
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของสารอีดีทีเอ.....	32
ตารางที่ 3.1 การประเมินด้วยสายตาต่อความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคะหลังจากการได้รับแคดเมียมและสารละลายอีดีทีเอ	50
ตารางที่ 4.1 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ	54
ตารางที่ 4.2 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ	55
ตารางที่ 4.3 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในน้ำที่มีการเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ	56
ตารางที่ 4.4 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ	62
ตารางที่ 4.5 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ	62
ตารางที่ 4.6 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ	63
ตารางที่ 4.7 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสารอีดีทีเอ.....	65
ตารางที่ 4.8 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียที่มีการเติมสารละลายผสมระหว่างสารละลายแคดเมียมและสารอีดีทีเอ.....	66
ตารางที่ 4.9 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอ	67
ตารางที่ 4.10 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสารละลายอีดีทีเอ.....	72
ตารางที่ 4.11 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียที่มีการเติมสารละลายผสมระหว่างแคดเมียม และสารละลายอีดีทีเอ	73
ตารางที่ 4.12 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำเสียที่มีการเติมสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสารละลายอีดีทีเอ	74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในสถานการณ์ปัจจุบัน ปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อสุขภาพของมนุษย์ พืชและสัตว์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาการปนเปื้อนของเสียอันตรายสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม อาทิ อุตสาหกรรมทำเหมือง อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมฟอกย้อม และอุตสาหกรรมฟอกหนัง เป็นต้น ในประเทศไทยพบปัญหาการปนเปื้อนของสารโลหะหนักในหลายภูมิภาค เช่น ปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียมทางภาคตะวันตกของประเทศไทย โดยตรวจพบปริมาณแคดเมียมในตัวกลางทางสิ่งแวดล้อม บริเวณรอบพื้นที่เหมืองสังกะสี อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก มีค่าสูงเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2547) โดย พบปริมาณแคดเมียมในน้ำผิวดินความเข้มข้น 0.3 ถึง 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงเป็นเหตุให้มีนักวิจัยหลายกลุ่มตระหนักถึงปัญหาดังกล่าว และให้ความสนใจในการหาแนวทางแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในพื้นที่ดังกล่าว

ทั้งนี้วิธีการบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนสารโลหะหนัก สามารถบำบัดได้หลายวิธีการ เช่น การบำบัดโดยวิธีทางกายภาพ การบำบัดด้วยวิธีทางเคมี และการบำบัดในทางชีวภาพ ทั้งในรูปแบบของการบำบัดภายในพื้นที่ปนเปื้อน (in-situ) และการบำบัดภายนอกพื้นที่ (ex-situ) เช่น การสูบน้ำที่ปนเปื้อนนำไปบำบัด (pump-and-treat) การบำบัดน้ำปนเปื้อนในพื้นที่ด้วยการเติมอากาศลงไป (in-situ air sparging) หรือใช้เทคโนโลยีการบำบัดน้ำปนเปื้อนด้วยกำแพงดินประติสฐ์ (permeable reactive barriers) เป็นต้น (Reddy, 2008) อย่างไรก็ตามวิธีการโดยส่วนใหญ่ที่กล่าวมาในช่วงต้นนี้แม้จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีแต่ก็มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดค่อนข้างสูง (Ensley, 2000) ในขณะเดียวกันมีอีกวิธีการหนึ่งที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดี และมีความเหมาะสมกับการแก้ปัญหการปนเปื้อนในประเทศไทย คือ เทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยพืช (phytoremediation) (Aisien et al., 2013; พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558) เป็นเทคโนโลยีในการนำพืชมาใช้ในการดูดดึงสารมลพิษ ตรึงสารมลพิษ หรือลดความเป็นพิษของสารมลพิษลง ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถบำบัดสารมลพิษในรูปสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ได้ทั้งในดิน ตะกอนท้องน้ำ และแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อน (Peer et al., 2007; USEPA., 2000; พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558) แม้ว่าการบำบัดสารมลพิษด้วยพืชนั้นจะมีข้อดีหลายประการแต่ก็มีขีดจำกัดในเรื่องของระยะเวลาในการการบำบัดสารมลพิษ จึงมีนักวิจัยหลายคณะทำการศึกษ และเสนอให้ใช้สารประกอบเชิงซ้อน (chelating agent) (Peer et al., 2007) ในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดดึงและสะสมสารโลหะหนักในพืช (Chaudhry et al., 2002) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารเอทิลีนไดเอมีนเทตระอะซิติก (อีดีทีเอ, ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ถูกแนะนำให้นำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสารโลหะหนักด้วยพืช ซึ่งสอดคล้องกับ

งานวิจัยของ Evangelou et al. (2007) ที่มีการรายงานว่า ประสิทธิภาพการดูดตั้งโลหะหนักของพืชเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารอิตีทีเอ

Ishii et al. (2013) ทำการศึกษาและวิจัย พบว่า หญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum purpureum*, napier grass, elephant grass) สามารถเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ปนเปื้อน และมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ปลูกเพื่อบำบัดแคดเมียมในพื้นที่ปนเปื้อน (Sabeen et al., 2013) อีกทั้งมีงานวิจัยในเชิงเปรียบเทียบระหว่างหญ้าเนเปียร์ ต้นทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) และข้าวฟ่าง (*Sorghum bicolor* L.) พบว่า หญ้าเนเปียร์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดตั้งแคดเมียม (Abdel-Salam, 2012) นอกจากนี้หญ้าเนเปียร์จะมีความเหมาะสมในการบำบัดแคดเมียมในพื้นที่ปนเปื้อนแล้วนั้น ยังเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ดี มีมวลชีวภาพสูง เหมาะแก่การนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าชีวมวล และยังเหมาะสมในการนำไปหมักเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ ด้วยเหตุนี้กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน จึงมีนโยบายในระยะเวลา 10 ปี (2555–2564) ในการนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อการผลิตไฟฟ้าจากหญ้าเนเปียร์เท่ากับ 3,000 เมกะวัตต์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้คัดเลือกและนำหญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* CV. Mott) มาใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้ และประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำโดยการเติมสารอิตีทีเอรวมด้วย (กระทรวงพลังงาน, 2556)

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาความทนทานของหญ้าเนเปียร์แคระต่อสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคดเมียมและสารอิตีทีเอ

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการเติมสารอิตีทีเอที่มีต่อการสะสมและการกระจายตัวของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ

1.2.3 เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ การกระจายตัวของแคดเมียม ลักษณะการเกิด และโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคดเมียมและสารอิตีทีเอในหญ้าเนเปียร์แคระ

1.3 สมมุติฐาน

การแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในน้ำเสียปนเปื้อนแคดเมียมลดลงเมื่อ มีการเติมสารอิตีทีเอ และสารอิตีทีเอ สามารถช่วยให้เกิดการสะสมและเคลื่อนที่ของสารแคดเมียมเข้าสู่หญ้าเนเปียร์แคระได้ดีขึ้น โดยสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมและอิตีทีเอจะสะสมบริเวณท่อลำเลียงน้ำและอาหารของหญ้าเนเปียร์แคระ

1.4 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษานี้ได้ทำการศึกษาและสังเกตความทนทานของหญ้าเนเปียร์แคระต่อสารแคดเมียมและอดีทีเอ นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการกระจายตัวของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระรวมไปถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน โครงสร้างของแคดเมียม และอดีทีเอ โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1.4.1 การศึกษาเบื้องต้น เพื่อศึกษาความทนทานของหญ้าเนเปียร์แคระต่อสารละลายแคดเมียม สารอดีทีเอ และสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสารอดีทีเอ โดยมีการเก็บตัวอย่างพืชขึ้นจากน้ำเสียในวันที่ 15, 30 และ 45 ของการทดลอง โดยมีการสังเกตและบันทึกอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (relative growth rate of plant; RGR) และการแสดงความเป็นพิษ รวมถึงศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในพืช ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (atomic absorption spectrometer; AAS) ซึ่งจากผลการทดลองในการศึกษาเบื้องต้นนี้ เพื่อได้ระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและอดีทีเอที่เหมาะสม หญ้าเนเปียร์แคระมีการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ที่สูง มีการแสดงความเป็นพิษต่ำ และมีการสะสมแคดเมียมในปริมาณที่สูง

1.4.2 การทดลอง เพื่อเปรียบเทียบผลของการเติมสารอดีทีเอที่มีต่อการสะสม การกระจายตัว การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน และโครงสร้างของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ โดยมีการเก็บตัวอย่างพืช และน้ำเสียในวันที่ 7, 15, 22, 30, 37, 45, 52, 60, 67, 75, 82, 90, 97 และ 105 ของการทดลอง เพื่อศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในพืชด้วยด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ ศึกษาการกระจายตัวของแคดเมียมด้วยเครื่องเลเซอร์อะบเลชันอินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโตรมิเตอร์ (laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometer; LA-ICP-MS), และลำแสงซินโครตรอน เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (x-ray fluorescence spectrometry; XRF) และได้ทำการวิเคราะห์การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนรวมถึงโครงสร้างระหว่างแคดเมียมและสารอดีทีเอด้วยลำแสงซินโครตรอนด้วยเทคนิค x-ray absorption near edge structure (XANES) โดยขอบเขตงานวิจัยโดยภาพรวมได้แสดงไว้ดังรูปที่ 1.1

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างการเติมสารอดีทีเอที่มีต่อระดับความทนทาน และการแสดงความเป็นพิษของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ

1.5.2 เข้าใจกลไกการสะสม การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ

1.5.3 เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระร่วมกับการเติมสารอดีทีเอ



รูปที่ 1.1 ขอบเขตของงานวิจัย

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แคดเมียม (cadmium, Cd)

แคดเมียมถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1817 โดย Friedrich Stohmeyer นักเคมีชาวเยอรมัน แคดเมียมมีชื่อในภาษาลาตินว่า cadmia และมีชื่อในภาษากรีกว่า kadmeia ซึ่งมีรากศัพท์มาจากคำว่า calamine ซึ่งเป็นคำที่มาจากกระบวนการแยกออกไซด์ของธาตุแคดเมียมที่อยู่ปะปนกับสังกะสีคาร์บอเนต (zinc carbonate, $ZnCO_3$) โดยทำให้ตกตะกอนด้วยไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แล้วรีดิวซ์ต่อไปทำให้เกิดเป็นแคดเมียมอิสระ (Stoeppler, 1992) โดยธรรมชาติมักพบแคดเมียมในบริเวณที่มีแร่สังกะสี จึงทำให้แคดเมียมเป็นผลผลิตพลอยได้จากกิจกรรมการทำเหมืองแร่และการถลุงแร่สังกะสี (Pendias and Pendias, 2000)

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของแคดเมียม

แคดเมียม เป็นโลหะทรานซิชันสีขาวฟ้าเป็นเงา มีความอ่อนตัวสูง คล้ายกับสังกะสี (zinc, Zn) และปรอท (mercury, Hg) มีเลขอะตอมเท่ากับ 48 จัดอยู่ในหมู่ 12 คาบที่ 5 ของตารางธาตุ โดยมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.1 แคดเมียมเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายได้ดีในสภาวะกรด หรือถูกทำละลายด้วยกรดไนตริก (H_2NO_3) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เป็นต้น แคดเมียมในธรรมชาติมักถูกออกซิไดซ์และเปลี่ยนรูปฟอร์มเป็นแคดเมียมออกไซด์ (CdO) จากความชื้นและออกซิเจนในอากาศ (Adriano, 2001)

แคดเมียมในธรรมชาติมักจะพบแคดเมียมในรูปแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) นอกจากนี้ยังสามารถพบได้ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ และสารประกอบเชิงซ้อนที่มีองค์ประกอบของแอมโมเนีย (NH_3) และไซยาไนด์ (CN) เช่น $Cd(NH_3)_6^{4+}$ และ $Cd(CN)_4^{2-}$ นอกจากนี้ แคดเมียมยังพบในอีกหลายรูปแบบ อาทิ สารประกอบอินทรีย์ เป็นต้น ทั้งนี้ แคดเมียมไอออนจะไม่ละลายกับสารละลายคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) สารละลายอาร์เซไนต์ (AsO_3^{3-}) สารละลายฟอสเฟต (PO_4^{3-}) และสารละลายเฟอร์โรไซยาไนด์ ($[Fe(CN)_6]^{3-}$) แต่สามารถทำละลายได้ดีในกรดไนตริก และทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วในกรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟูริก (Adriano, 2001) แคดเมียมเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตสังกะสี แคดเมียมมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อน และนิยมใช้เป็นแผ่นป้องกันบนโลหะชนิดอื่นๆ ทั้งนี้เมื่อนำแคดเมียมผสมกับโลหะบางชนิดจะทำให้โลหะดังกล่าวมีจุดหลอมเหลวลดลง จึงเป็นปัจจัยสำคัญทำให้แคดเมียมเป็นที่แพร่หลาย และถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่นิกเกิล (นิกเกิลแคดเมียม) หรือแบตเตอรี่แบบชาร์จไฟได้ อุตสาหกรรมการทำสี อุตสาหกรรมเคลือบและชุบโลหะ อุตสาหกรรมการ

ผลิตพลาสติก อุตสาหกรรมการผลิตอัลลอยด์ และอุตสาหกรรมการหลอมและการผสมโลหะ (Borsari, 2014)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแคดเมียม

คุณสมบัติ	รายละเอียด
สูตรทางเคมี	Cd
มวลอะตอม	112.4 กรัม ต่อ โมล
โครงสร้างผลึก	เฮกซะโกนอล (hexagonal)
ความหนาแน่น	8.65 กรัม ต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	321 ° C (610 ° F)
จุดเดือด	765 ° C (1,410 ° F)
ค่าการละลาย ที่ 20 °C	0.04 กรัม ต่อ 100 มิลลิลิตร

ที่มา: ดัดแปลงจาก Adriano (2001); Hooser (2007)

2.1.2 แคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่ถูพบได้ในธรรมชาติ มีการกระจายในแผ่นเปลือกโลกมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยประมาณ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (IPCS, 1992) ในบรรยากาศบริเวณพื้นที่ห่างไกลจากภาคอุตสาหกรรมพบว่า มีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่า 0.01 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในแหล่งชุมชนพบว่า มีปริมาณแคดเมียมในบรรยากาศต่ำกว่า 0.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และในบริเวณพื้นที่ศักยภาพแหล่งแร่สังกะสีที่มีการทำเหมืองและไม่มีการทำเหมืองพบว่า มีปริมาณแคดเมียมในบรรยากาศสูงกว่า 0.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Chang et al., 2003) แคดเมียมถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ผ่านหลายตัวกลางเช่น การแพร่กระจายของแคดเมียมสู่ชั้นบรรยากาศจากกิจกรรมการเผาไหม้ และกลิ่นในอุตสาหกรรมการทำเหมืองถ่านหิน โดยอนุภาคขนาดเล็กของแคดเมียมที่ติดอยู่กับอนุภาคของฝุ่นละอองขนาดเล็กอาจแพร่กระจายไปในอากาศและปลิวไปตามกระแสลมก่อนที่จะตกกลับลงมายังพื้นดินอีกครั้ง โดยกระบวนการตกกลับแบบแห้ง (dry depositions) หรือกระบวนการตกกลับแบบเปียก (wet depositions) นอกจากนี้แคดเมียมยังสามารถแพร่กระจายสู่แหล่งน้ำจากการปลดปล่อยน้ำเสียชุมชน และน้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรม รวมไปถึงการใช้ปุ๋ยเคมี เช่น ปุ๋ยฟอสเฟต (P_2O_5) ที่มีสารแคดเมียมเจือปนในปริมาณที่น้อยเป็นระยะเวลานานซึ่งส่งผลต่อพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีเป็นระยะเวลานาน นอกจากนี้การรั่วไหล และเกิดการชะล้างของน้ำฝนจากพื้นที่ปนเปื้อนเดิมนับว่าเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายของแคดเมียมในดินผ่านไปยังแหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดินได้ ทั้งนี้เมื่อแคดเมียมแพร่กระจายและปนเปื้อนในตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมเป็นระยะเวลานาน แคดเมียมบางส่วนจะเกิดการยึดเกาะกับอนุภาคดิน และบางส่วนจะ

ยังคงอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ดี ซึ่งจะถูกดูดซับ และลำเลียงเข้าสู่ระบบรากพืชได้ (Adriano, 2001; Raskin and Ensley, 2000)

2.1.3 ความเป็นพิษของแคดเมียม

ความเป็นพิษของแคดเมียมถูกแยกออกเป็น 2 ประเภท คือ ความเป็นพิษเฉียบพลัน และ ความเป็นพิษเรื้อรัง (Chang, and Tjalkens, 2010; Guigan and Michael, 2012) สำหรับความเป็นพิษแบบเฉียบพลันเกิดจากกระบวนการหายใจเอาฝุ่นละอองของแคดเมียมเข้าไปในระบบทางเดินหายใจ หลังรับสัมผัสเป็นระยะเวลา 2-3 ชั่วโมงจะก่อให้เกิดอาการไอ เจ็บหน้าอก เหงื่อออก หายใจลำบาก อ่อนเพลีย ส่วนความเป็นพิษเรื้อรัง ผลต่อระบบทางเดินหายใจ การทำงานของไตมีประสิทธิผลลดลง มีโปรตีนในปัสสาวะ นอกจากนี้การสะสมแคดเมียมในร่างกายจะทำให้เกิดโรคอิต-อิต

2.1.4 ค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

ในประเทศไทยมีการกำหนดค่ามาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อมไว้หลายพารามิเตอร์ด้วยกัน โดยมีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานไว้หลายตัวกลางดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าเกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

ตัวกลางทางสิ่งแวดล้อม	ค่ามาตรฐาน
ดินที่ใช้ประโยชน์อื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม	810 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม	37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
น้ำผิวดิน	0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม	0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำบาดาลเพื่อการบริโภค	0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำดื่มในภาชนะปิดสนิท	0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร

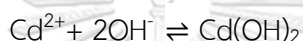
ที่มา: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (2547); กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2535)

2.1.5 ปฏิริยาเคมีของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

แคดเมียมที่แพร่กระจายในตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น ในรูปไอออนอิสระ สารประกอบของโลหะอนินทรีย์ หรือสารประกอบของโลหะอินทรีย์ ในธรรมชาติมักพบในรูปของแคดเมียมไดวาเลนต์ (cadmium divalent; Cd^{2+}) ทั้งนี้มีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปฟอร์มของแคดเมียม เช่น ผลของค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ปริมาณสารอินทรีย์ กล่าวคือ แคดเมียมจะจับกับสารหรือไอออนต่างๆ ในตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมได้ดีแตกต่างกัน เช่น กรดฮิวมิก (humic acid;

C₁₈₇H₁₈₆O₈₉N₉S₁) > คาร์บอเนตไอออน (carbonate ion; CO₃²⁻) > ไฮดรอกไซด์ไอออน (hydroxide; OH⁻) > คลอไรด์ไอออน (chloride; Cl⁻) > ซัลเฟตไอออน (sulfate; SO₄²⁻) เป็นต้น สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดในสิ่งแวดล้อมประกอบด้วย 3 ปฏิกิริยาหลักๆ (Wang and Tessier, 1999) คือ

1) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) คือ การแตกตัวหรือเปลี่ยนรูปฟอร์มของแคดเมียมเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ แคดเมียมจะรวมตัวเป็นสารประกอบไฮดรอกซิล (hydroxyl group; OH⁻) เช่น แคดเมียมไฮดรอกซิเลท (cadmium hydroxylated; CdOH⁺) แคดเมียมไฮดรอกไซด์ (cadmium hydroxide; Cd(OH)₂) เป็นต้น แคดเมียมที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสหรือละลายน้ำได้โดยส่วนใหญ่มีวาเลนซ์ 2+ (divalent cation) ทั้งนี้เมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่าง สูงกว่า 9 แคดเมียมที่ละลายในน้ำจะเกิดการตกตะกอน และคงตัวในรูปของของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ โดยฟอร์มตัวในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 2.1



สมการที่ 2.1

2) ปฏิกิริยารวมตัว (sorption) คือ การรวมตัวโดยที่แคดเมียมติดอยู่กับผิวของไฮดรอกไซด์ เกลือหรือสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดหรือกำจัดแคดเมียม โดยพบว่า ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างปริมาณแคดเมียมที่สะสมในดินตะกอนที่เพิ่มขึ้น และการลดลงของสารอินทรีย์ในดินตะกอน โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นไปตาม freundlich isotherm ดังสมการที่ 2.2 (Suzuki et al., 1979) โดยปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยารวมตัวคือ ปริมาณของแคดเมียม ชนิดของแคดเมียม อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และสารฮิวมิก (humic substances)

$$\text{O.M.} = \text{KC}^{1/n}$$

สมการที่ 2.2

โดย O.M. = ปริมาณสารอินทรีย์
C = ปริมาณแคดเมียมในน้ำ
K และ N = ค่าคงที่จากการทดลอง

3) การเปลี่ยนไปโดยปฏิกิริยาของออกซิเจน (oxidation) คือ ปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับแคดเมียม เช่น ปริมาณออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ลดลง จะพบแคดเมียมที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้นในรูปของไฮเดรทไดวาเลนซ์แคดไอออน

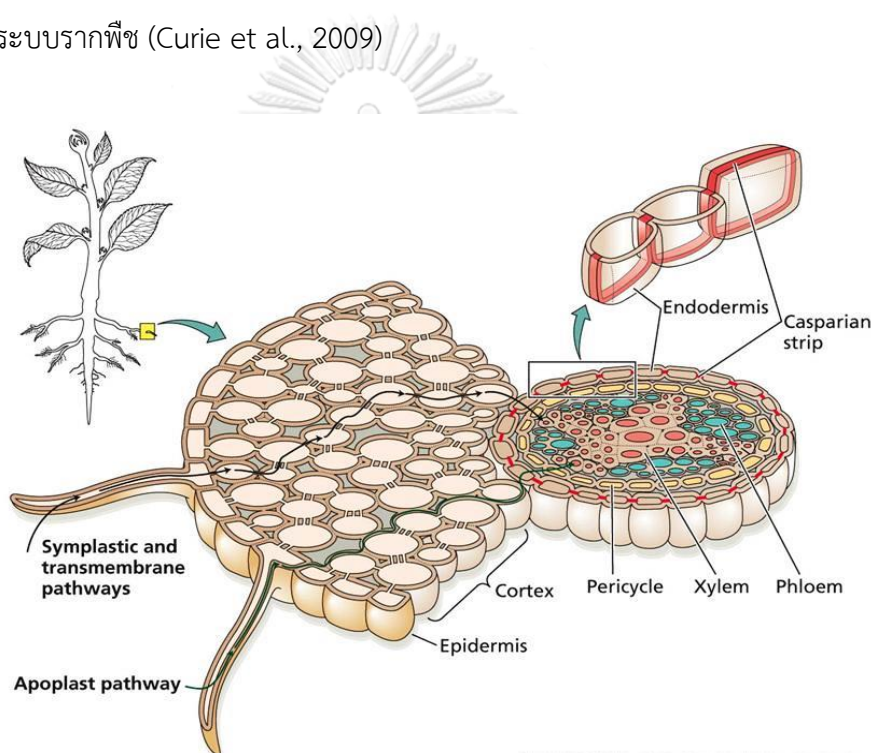
2.1.6 กลไกการสะสมแคดเมียมในพืช

แคดเมียม เป็นธาตุอาหารที่ไม่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืช แคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นสูง จะแสดงความเป็นพิษต่อพืช (White and Brown, 2010) ยกเว้นพืชในกลุ่มพืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณมากเป็นพิเศษ (hyper accumulator plants หรือ hyperaccumulator species) ซึ่งสามารถทนต่อแคดเมียมได้ถึงระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม แคดเมียมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งพืช (Verbruggen et al., 2009) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการสะสมโลหะหนักในพืชชนิดนั้น จะเห็นได้ว่า การดูดตึงน้ำ และธาตุอาหารเป็นหน้าที่หลักของรากพืช เนื่องจากรากพืชจะมีการแตกแขนง และชอนไชไปในอนุภาคของดิน อีกทั้งส่วนปลายจะมีขนราก (root hair) จำนวนมาก จึงเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับน้ำที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างภายในดินได้เป็นอย่างดี ขนรากจึงสามารถดูดตึงน้ำได้ด้วยกระบวนการออสโมซิส (osmosis) และธาตุอาหาร (Enstone et al., 2003; Javot and Maurel, 2002) โดยเนื้อเยื่อชั้นนอก (epidermis) ของระบบรากมีบทบาทสำคัญ หากพิจารณาความเข้มข้นของธาตุอาหาร และโลหะหนักในดิน เช่น แคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) ต่อปริมาณการดูดตึงแล้วนั้น จะขึ้นอยู่กับปริมาณลิแกนด์บริเวณรากพืช ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการดูดตึงธาตุอาหาร รวมถึงแคดเมียมไอออนด้วย (Reeves and Chaney, 2008) ขนรากนั้นเป็นส่วนเนื้อเยื่อชั้นนอกที่ยื่นออกมาและเป็นส่วนของเซลล์ที่ติดต่อกันตลอดเพราะเป็นเซลล์เดียวกันกับเซลล์เนื้อเยื่อชั้นนอก ขนรากที่ยังอ่อนอยู่นั้นจะมีแวคิวโอล (vacuole) ขนาดเล็กๆ หลายอัน แต่เมื่อเซลล์ของขนรากมีอายุมากขึ้น แวกิวโอลขนาดเล็กหลายๆ อันจะมีการรวมกันเป็นแวคิวโอลขนาดใหญ่เกือบเต็มเซลล์ของเนื้อเยื่อชั้นนอก ภายในจะมีสารละลายบรรจุอยู่เต็มเซลล์ ซึ่งสารละลายนี้มีความเข้มข้นค่อนข้างสูงเพราะมีแร่ธาตุต่างๆ ละลายอยู่มาก และในสภาวะปกติ สารละลายที่อยู่รอบๆ รากที่แทรกอยู่ในช่องว่างของดินจะมีความเข้มข้นน้อยกว่าสารละลายภายในราก ดังนั้นน้ำจากดินจึงแพร่เข้าสู่ขนรากของเซลล์เนื้อเยื่อชั้นนอกได้ตลอดเวลา ความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายภายในรากและภายในดินจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดตึงน้ำของพืช ซึ่งหากระดับความเข้มข้นของสารละลายในดินสูง พืชจะดูดตึงน้ำได้ยาก และยิ่งสารละลายมีระดับความเข้มข้นสูงมากๆ จะยิ่งทำให้พืชไม่สามารถดูดตึงน้ำไปใช้ได้ และอาจเกิดอันตรายต่อพืชมากยิ่งขึ้น สำหรับกลไกการดูดตึงโลหะหนักด้วยพืช (plant uptake) เป็นกระบวนการที่แคดเมียมถูกดูดตึงเข้าสู่รากของพืชพร้อมกับน้ำที่รากของพืชดูดตึงเข้ามา (Welch and Norvell, 1999) โดยผ่านการเคลื่อนที่ของน้ำได้ มี 2 กระบวนการ คือ กระบวนการอะพลาสติก (apoplastic pathway) และกระบวนการซิมพลาสติก (symplastic pathway) ดังรูปที่ 2.1 สำหรับการสะสมแคดเมียมไอออนเข้าสู่ระบบรากนั้นเกิดจาก 3 กลไก ต่อไปนี้

1) กระบวนการหายใจของพืชทำให้เกิดการแตกตัวของ H_2CO_3 เป็น H^+ และ HCO_3^- ที่เนื้อเยื่อชั้นนอกของรากพืชบริเวณพลาสมาเมมเบรน และเกิดการแลกเปลี่ยนประจุของ H^+ และแคดเมียมไอออน ทำให้มีการสะสมของแคดเมียมในเนื้อเยื่อชั้นนอก ซึ่งกระบวนการนี้ไม่ได้ใช้พลังงานในการดูดตึงแคดเมียม (Namiki et al., 2011)

2) แคดเมียมไอออน เคลื่อนที่ไปกับน้ำและแร่ธาตุอาหาร ผ่านช่องพลาสโมเดสมาตา (plasmodesmata) เช่นเดียวกับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) สังกะสีไอออน (Zn^{2+}) และเหล็กไอออน (Fe^{2+}) วิธีการนี้ประกอบด้วยกลไกในการเคลื่อนที่ของน้ำ 2 แบบ คือ (1) แบบพาสซีฟทรานสปอร์ต (passive transport) และ (2) แบบแอคทีฟทรานสปอร์ต (active transport) โดยกลไกแบบแอคทีฟทรานสปอร์ตต้องใช้พลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์พืช ได้แก่ การลำเลียงผ่านตัวลำเลียงประจุบวก และการแพร่ผ่านเข้าช่องที่เป็นประจุบวกสอง (divalent cation membrane channel) โดยโลหะหนักจะผ่านเข้าเยื่อหุ้มเซลล์พืชด้วยกลไกดังกล่าว (Kochian, 1991)

3) รากพืชหลังสารประกอบโมเลกุลต่ำ เช่น mugineic acids (MAs) ซึ่งปีนสารคีเลตที่สามารถจับกับแคดเมียมไอออน โดยเพิ่มการละลาย และการซึมผ่านของแคดเมียมไอออนสู่เนื้อเยื่อชั้นนอกของระบบรากพืช (Curie et al., 2009)



รูปที่ 2.1 กลไกของการดูดตั้งสารโลหะหนักด้วยพืช

ที่มา: Bazihizina et al. (2015)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ (Seregin and Kozhevnikova, 2004) ที่มีการปลูกพืชในดินปนเปื้อน พบว่า มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น อีกทั้งพืชทดลองได้มีการสร้างสารซูเบอร์ลิน (suberin) บริเวณปลายรากระหว่างเนื้อเยื่อชั้นนอก และเนื้อเยื่อชั้นใน (Maruthi et al., 2007) หลังจากการดูดตั้งผ่านเข้าสู่เนื้อเยื่อชั้นนอกของพืชแล้วนั้น แคดเมียมไอออนจะถูกส่งผ่านแคสพาเรียนสตริป (casparian strip) เข้าสู่เนื้อเยื่อชั้นใน และถูกส่งไปยังท่อลำเลียงน้ำ (xylem) และลำเลียงอาหารหรือแร่ธาตุ (phloem) ต่อไป (Akhter et al., 2014) แคดเมียมและแร่

ธาตุจะถูกดูดตั้งจากรากสู่ท่อลำเลียงน้ำ โดยอาศัยกระบวนการออสโมพลาสติก และกระบวนการซิมพลาสต์ (Song et al., 2016) ดังรูปที่ 2.1

พืชสามารถดูดตั้งและสะสมโลหะหนัก โดยการสะสมและเคลื่อนที่จากรากแล้วเคลื่อนย้ายไปสะสมในลำต้น ใบ และยอดของพืช ทั้งนี้การเก็บเกี่ยวเนื้อเยื่อพืชในส่วนเหนือดิน (ลำต้น ใบ และยอด) ไปเผา และ/หรือ ผึ่งย้งหลุมฝังกลบแบบปลอดภัยก็เป็นวิธีการหนึ่งในการกำจัดสารโลหะหนักออกจากพื้นที่ปนเปื้อน (Lai and Chen, 2005) ซึ่งโลหะบางชนิดสามารถสกัดและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งนับได้ว่าเป็นการลดของเสียอันตรายและสร้างรายได้จากกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่อีกด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า พืชหลายชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ปนเปื้อน โดยเฉพาะพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมที่มีการศึกษา พบว่า *Arabis paniculata*, *Sedum alfredii*, *Sesbania drummondii* และ *Thlaspi praecox* สามารถเจริญเติบโตได้ดี และมีการสะสมแคดเมียมไว้ในพืชได้สูง เท่ากับ 1,127, 2,183, 1,687 และ 1,000 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งพืชตามลำดับ (Sarma, 2011) ทั้งนี้การสะสมและกระจายของแคดเมียมจากรากสู่ยอดพืชมีความแตกต่างกันไปตามชนิด และสายพันธุ์ของพืชทดลอง รวมถึงระยะเวลาในการศึกษาทดลองอีกด้วย เช่น การศึกษาของ (Reddy and Patrick, 1977) พบว่า การสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่ทำการทดลองมีการสะสมบริเวณส่วนเหนือดิน ประมาณ 79 เปอร์เซ็นต์ ของแคดเมียมทั้งหมดในต้นข้าว โดยพฤติกรรมการสะสมโลหะหนัก และปริมาณการสะสมโลหะหนักของพืชนั้นขึ้นกับปัจจัยแวดล้อมบางอย่าง เช่น ความเข้มข้นของแคดเมียม อุณหภูมิ ความชื้น และค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ซึ่งส่งผลต่อลักษณะการสะสมและกระจายตัวของแคดเมียมระหว่างราก ลำต้น และใบของพืชทดลอง (Adriano, 2001) และในทำนองเดียวกันพืชน้ำ สามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนได้เช่นกัน เช่น ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) (Gomathi et al., 2010; Tananonchai and Sampanpanish, 2014) ต้นผักบุ้ง (*Ipomea aquatic*) (Wang et al., 2008) มัสตาร์ดอินเดีย (*Brassica juncea*) (Salt et al., 1995; Salt et al., 1998) สาหร่ายฉัตร (*Myriophyllum spicatum*) (Wang et al., 2009) และแหวน (*Duckweed*) (Zayed et al., 1998) ที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก

2.1.7 การแสดงความเป็นพิษของแคดเมียมในพืช

แคดเมียม เป็นสารพิษสำหรับพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นมากกว่า 5-10 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (White and Brown, 2010) ยกเว้น พืชที่มีความสามารถในการสะสมแคดเมียมได้ในปริมาณที่มากเป็นพิเศษ (Cd-hyperaccumulators) ที่สามารถทนต่อความเข้มข้นของแคดเมียมได้ (Verbruggen et al., 2009) แม้ว่าแคดเมียมจะมีความเป็นพิษต่อพืชสูง แต่แคดเมียมจะถูกดูดซึมได้ง่ายผ่านกระบวนการดูดตั้งน้ำ และธาตุอาหารของพืช จากรากพืช และถูกลำเลียงผ่านท่อลำเลียงน้ำและท่อลำเลียงอาหารไปยังเนื้อเยื่อเหนือพื้นดิน (Liu et al., 2010) และเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร (Gill and Tuteja, 2011) การที่พืชสะสมแคดเมียมไว้ในปริมาณที่สูงนั้น ทำให้

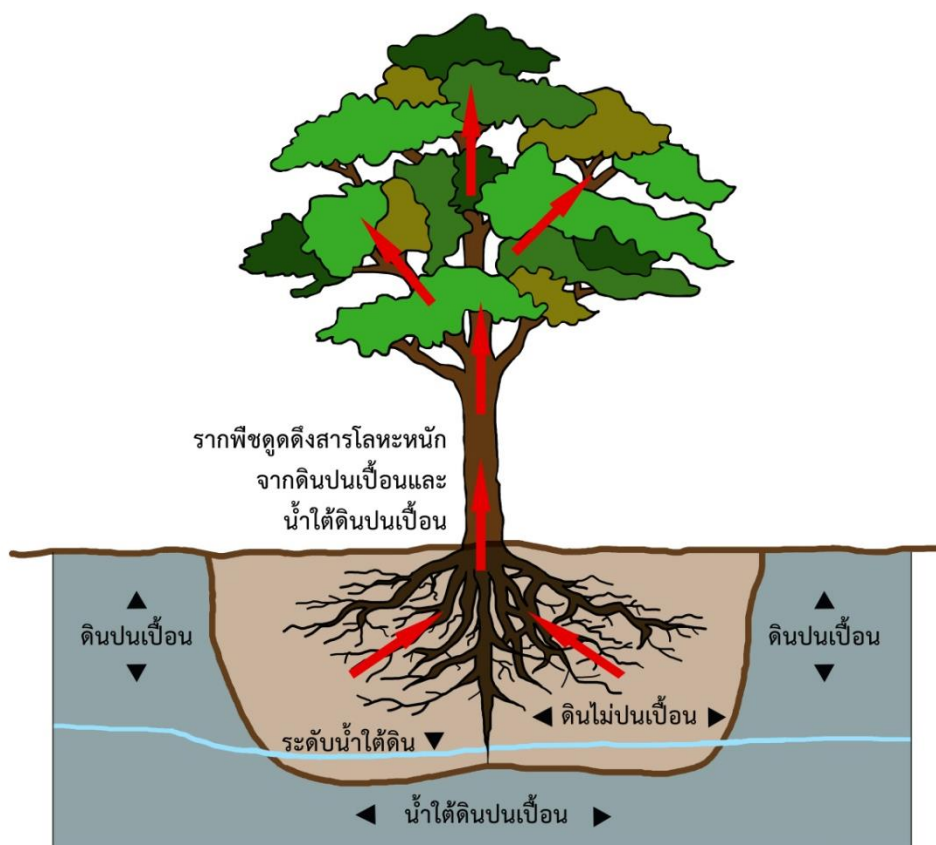
กระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) การดูดตั้งน้ำ และแร่ธาตุของพืชลดลง สำหรับการที่พืชปลูกไว้ในพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมในปริมาณที่สูงนั้นพืชจะแสดงอาการความเป็นพิษทางใบ และพฤติกรรมการเจริญเติบโต (Mohanpuria et al., 2008) นอกจากนี้ ยังมีรายงานระบุว่า ความเข้มข้นของแคดเมียมที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดการแสดงความเป็นพิษ ลดอัตราการสังเคราะห์แสง และลดความสามารถในการซึมผ่านของธาตุอาหารของเยื่อหุ้มเซลล์ได้อีกด้วย (Pendias and Pendias, 2000)

นอกจากนี้ พืชที่เจริญเติบโตในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของสารแคดเมียมในปริมาณสูง จะแสดงอาการความเป็นพิษทางใบ และพฤติกรรมการเจริญเติบโต เช่น อาการใบเหลือง (chlorosis) อาการใบจุดขาว (necrosis) การยับยั้งการเจริญเติบโต (growth inhibition) และการเกิดสีน้ำตาลของปลายราก (browning of root tips) ซึ่งในที่สุดสามารถทำให้พืชตายได้ (Evangelou et al., 2007) แคดเมียมสามารถดูดตั้งได้ง่ายไปพร้อมกับธาตุอาหารของพืช โดยลำเลียงจากรากพืชไปยังเนื้อเยื่อพืชในส่วนเหนือพื้นดิน (Liu et al., 2010) ภายใต้สภาวะปกติ พืชจะดูดตั้งแคดเมียมจากดิน และน้ำในดินได้ในปริมาณเล็กน้อย (Benavides et al., 2005) เช่น การศึกษาของ Holmgren et al. (1993) พบว่า ข้าวสาลี และข้าวโพดมีการสะสมแคดเมียมในพืชต่ำกว่า 0.30 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งพืช (ข้าวสาลี 0.20 และข้าวโพด 0.17 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งพืช) ทั้งนี้คุณสมบัติของดินก็เป็นปัจจัยสำคัญของการดูดตั้งแคดเมียมเข้าสู่พืชด้วยเช่นกัน เช่น อนุภาคของดิน ชนิดของดิน และเทหวัตถุที่เป็นองค์ประกอบของดิน เป็นต้น (Adriano, 2001)

2.2 การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช (phytoremediation)

การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยการใช้พืช นั้นมีรากศัพท์มาจากภาษากรีก คำว่า “phyton” หมายถึง “พืช” และภาษาละติน คำว่า “remediare” หมายถึง “การบำบัด” (Vangronsveld and Cunningham, 1998) เมื่อนำทั้งสองคำนี้มารวมกัน จึงให้ความหมายว่า การนำพืชมาใช้ในการบำบัดตัวกลางสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อน เช่น ดิน ดินตะกอนท้องน้ำ และน้ำ ที่ปนเปื้อนสารมลพิษ ทั้งในรูปสารอินทรีย์ เช่น ไตรไนโตรโทลูอีน (trinitrotoluene) ไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene) เบนซีน (benzene) โทลูอีน (toluene) เอทิลเบนซีน (ethylbenzene) และไซลีน (xylene) เป็นต้น (USEPA., 2000) และสารอนินทรีย์ เช่น โลหะหนัก (heavy metals) และนิวไคลด์กัมมันตรังสี (radionuclides) เป็นต้น ทั้งนี้กระบวนการบำบัดสารมลพิษด้วยพืชนั้น อาศัยกระบวนการดูดตั้งน้ำ และแร่ธาตุอาหารของพืชจากตัวกลางสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อน เช่น ดินปนเปื้อนผ่านทางรากของพืช หลังจากที่สารมลพิษดูดตั้ง และเคลื่อนที่จากรากเข้าสู่ทางท่อลำเลียงน้ำ และท่อลำเลียงอาหารแล้วสารมลพิษก็จะเคลื่อนย้ายไปพร้อมกับน้ำและธาตุอาหาร โดยถูกลำเลียง และสะสมในส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ส่วนราก ลำต้น ใบ และยอด และ/หรือระเหยออกทางปากใบของพืชได้เช่นกัน การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโดยการใช่พืช จึงเป็นการใช้กระบวนการทำงานของพืชเพื่อเคลื่อนย้าย

กักเก็บ บำบัด และลดอันตรายของสารมลพิษ และลดปริมาณสารมลพิษบริเวณพื้นที่ปนเปื้อนให้เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมลดลง หมดลง หรือให้เหลือน้อยที่สุด ดังในรูปที่ 2.2

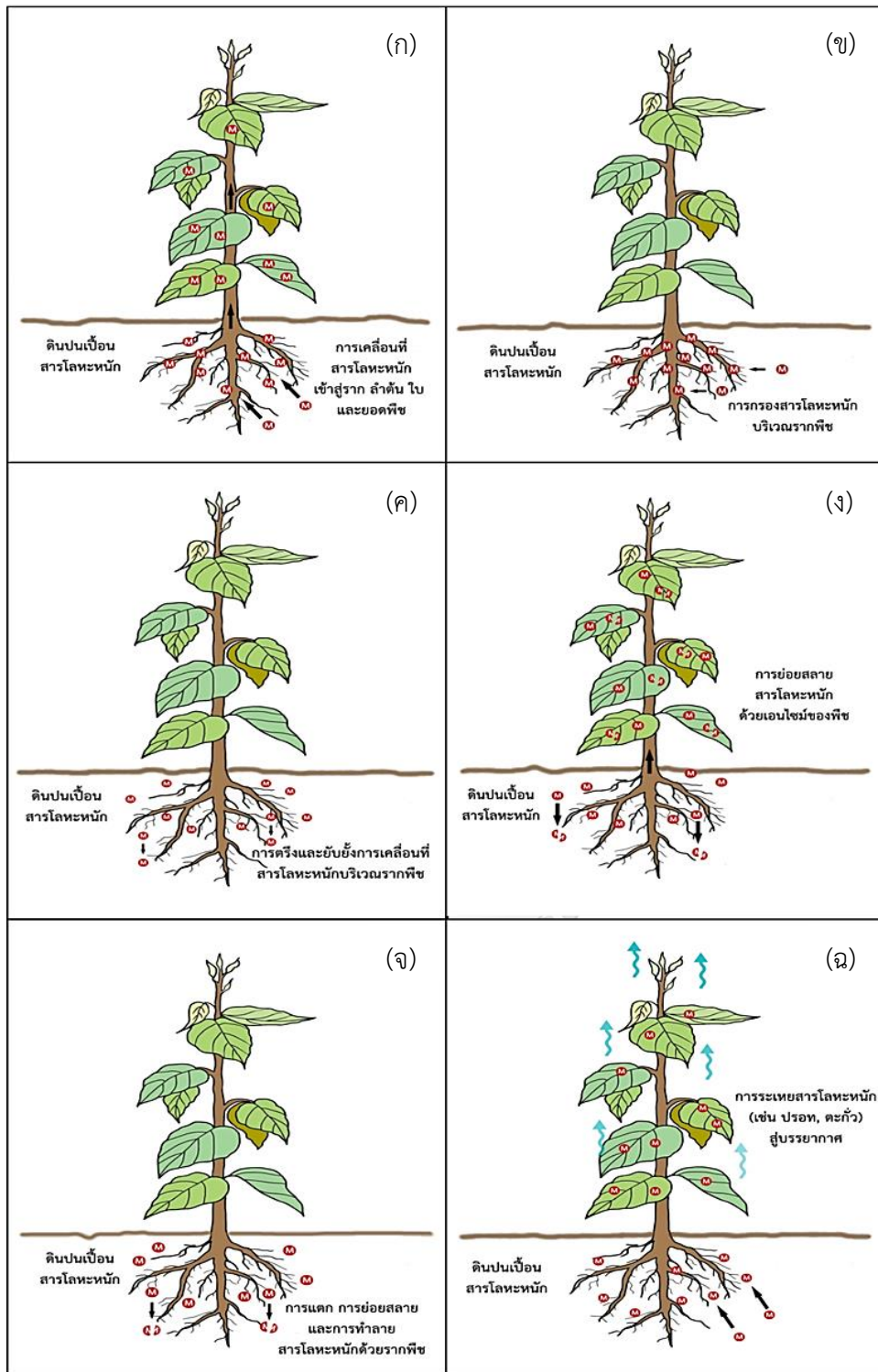


รูปที่ 2.2 กระบวนการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช
ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2558)

ปัจจัยสำคัญของการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโดยพืช คือ การเลือกใช้พืชในการบำบัดสารมลพิษในบริเวณที่มีการปนเปื้อน นอกจากนี้ยังต้องมีความเข้าใจพฤติกรรมของสารมลพิษที่จะทำการบำบัดในตัวกลางนั้นๆ และปัจจัยทางกายภาพ ชีววิทยาและเคมีอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติเพื่อช่วยให้การบำบัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโดยพืชจึงเป็นแนวทางเลือกหนึ่งสำหรับใช้บำบัดสารมลพิษโดยการพึ่งพาพืชสีเขียวที่มีอยู่แล้วในระบบธรรมชาติ เป็นวิธีที่ประหยัดและมีต้นทุนในการบำบัดสารมลพิษ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ

2.2.1 ประเภทของการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช

การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทตามกระบวนการกำจัดสารมลพิษที่เกิดขึ้นภายใน และภายนอกพืช รวมทั้งบริเวณพื้นที่ปนเปื้อนที่พืชทำการบำบัดสารมลพิษต่างๆ โดยสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.3 ประเภทของการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช (ก) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (ข) การกกรองสารมลพิษด้วยรากพืช (ค) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (ง) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (จ) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช และ (ฉ) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช
ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2558)

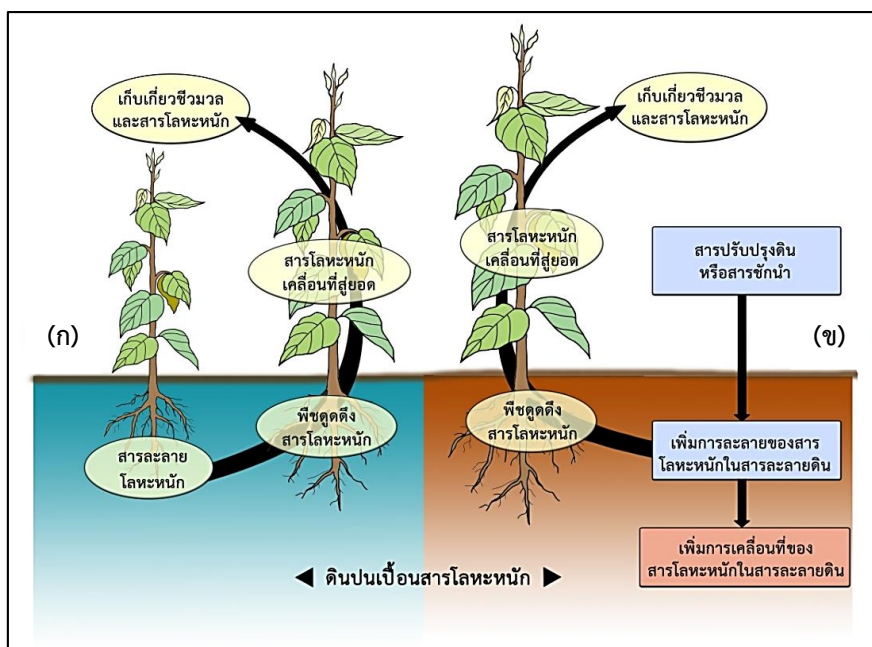
1) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (phytoextraction) เป็นการนำพืชที่มีความสามารถในการดูดซับ (uptake) และสะสม (accumulation) สารมลพิษ โดยใช้พืชเพื่อดูดซับ และเคลื่อนย้ายสารมลพิษจากตัวกลางสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อน อาทิ ดินที่ปนเปื้อนนำมาสะสมไว้ที่รากพืช และเคลื่อนย้ายไปสะสมยังส่วนต่างๆ ของพืช โดยพืชชนิดนั้นต้องเป็นพืชกลุ่มไฮเปอร์แอคคิวมิวเลเตอร์ (hyperaccumulator) ที่สามารถสะสมสารมลพิษได้ปริมาณมากถึง 100-1,000 เท่า หรือมีปริมาณที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่นๆ ซึ่งพืชกลุ่มไฮเปอร์แอคคิวมิวเลเตอร์ มีลักษณะทั่วไปคือ เป็นพืชที่มีความสามารถในการดูดซับสารมลพิษได้ในปริมาณมาก สามารถนำไปสะสมไว้ภายในรากของพืช และมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารมลพิษจากดินปนเปื้อนไปที่รากได้ในอัตราที่สูง และมีการสะสมสารมลพิษได้ในปริมาณที่สูงโดยเฉพาะที่เซลล์ของรากพืช และส่วนที่อยู่เหนือดินของพืชชนิดนั้น อีกทั้งพืชยังมีความทนทานต่อระดับความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในระดับที่สูงกว่าระดับปกติของพืชทั่วไป พืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการดูดซับสารมลพิษต่างๆ ออกจากตัวกลางสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อน เช่น ดิน และน้ำที่ปนเปื้อนได้ สำหรับพืชกลุ่มไฮเปอร์แอคคิวมิวเลเตอร์นั้น เป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีและมีความสามารถในการสะสมธาตุอาหาร และ/หรือโลหะหนักในพืชได้ดี (Pendias and Pendias, 2000)

กลไกการทำงานของ การสกัดสารมลพิษด้วยพืชหรือ phytoextraction ประกอบด้วยกระบวนการหลัก 2 ประการ คือ 1) การลำเลียงสารมลพิษและ/หรือโลหะหนักผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ทางรากพืช และ 2) ลำเลียงสารมลพิษ และ/หรือโลหะหนักผ่านตัวลำเลียงประจุบวก และการแพร่ผ่านเข้าสู่ช่องที่เป็นประจุบวก (divalent cation membrane channel) ซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายสารมลพิษ และ/หรือโลหะหนักจากรากพืชสู่ยอดพืช โดยสารมลพิษ และ/หรือโลหะหนักจะถูกขนย้ายผ่านทางท่อลำเลียงน้ำ โดยอาศัยกระบวนการคายน้ำ (transpiration) (Kochian, 1991) กลไกการทำงานของ การสกัดสารมลพิษด้วยพืชสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3(ก) และประเภทของการสกัดสารมลพิษด้วยพืชสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การบำบัดสารมลพิษด้วยการปลูกพืชในดินแบบธรรมชาติ (natural phytoextraction) และการบำบัดสารมลพิษด้วยการเติมสารปรับปรุงดินหรือสารชักนำ (induced phytoextraction) ดังรูปที่ 2.4

การบำบัดสารมลพิษด้วยการปลูกพืชในดินแบบธรรมชาติ เป็นการบำบัดสารมลพิษโดยวิธีการปลูกพืชในพื้นที่ปนเปื้อนด้วยสารมลพิษ แล้วทำการรดน้ำใส่ปุ๋ยเท่าที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชเท่านั้น โดยบางกรณีพืชอาจสามารถเจริญเติบโตได้โดยไม่ต้องใส่ปุ๋ยหรือรดน้ำ แต่อาศัยน้ำฝนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ส่วนใบและลำต้นพืชที่มีการสะสมสารมลพิษจะถูกเก็บเกี่ยว และทำการบำบัดโดยวิธีการที่เหมาะสมต่อไป (รูปที่ 2.4(ก)) โดยพืชที่เลือกใช้นั้น นิยมใช้พืชที่เจริญเติบโตตามแหล่งที่มีการปนเปื้อนเดิมอยู่แล้ว และเป็นพืชที่ทนทานต่อความเข้มข้นของโลหะหนักหรือสารมลพิษอื่นๆ โดยทั่วไปแล้วพืชเหล่านี้เป็นพืชที่มีระบบรากตื้น และเจริญเติบโตไม่รวดเร็วนัก และเมื่อเจริญเติบโตเต็มที่แล้วจะมีขนาดที่ไม่ใหญ่โตนัก

การบำบัดสารมลพิษด้วยการเติมสารปรับปรุงดินหรือสารชักนำ เป็นการบำบัดสารมลพิษโดยการเลือกใช้พืชที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วตลอดอายุการเจริญเติบโตรวมกับการเติมสารปรับปรุง

ดินหรือสารชักนำ (inducing agent) เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษสู่พืชมากขึ้น
ยังผลให้เพิ่มขีดความสามารถในการบำบัดสารมลพิษ (รูปที่ 2.4(ข))



รูปที่ 2.4 ประเภทของการสกัดสารมลพิษ (Phytoextraction)

ที่มา: พันธวิศ สัมพันธ์พานิช (2558)

2) การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช (rhizofiltration) เป็นการใช้พืชที่มีความสามารถในการกรอง ดูดซับ และรับเอาสารมลพิษต่างๆ ที่อยู่ในรูปของสารละลายบริเวณรากพืชให้เข้าไปในระบบรากของพืช ดังนั้นสารมลพิษจึงสะสมอยู่เฉพาะส่วนราก โดยในส่วนของใบ ดอก และลำต้น จะไม่มีการสะสมหรือปนเปื้อน ทั้งนี้ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้ว สามารถนำพืชไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้ตามวัตถุประสงค์ พืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะมีความเหมาะสมในการนำไปกำจัดสารปนเปื้อนต่างๆ ในแหล่งน้ำหรือในดินที่มีความชุ่มชื้นของน้ำสูงหรือเป็นระบบไฮโดรโปนิคส์ (hydroponics) การกรองด้วยรากพืชนี้สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 2.3(ข)

3) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (phytostabilization) เป็นการใช้พืชที่มีความสามารถในการลดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษที่ปนเปื้อนในดิน และน้ำใต้ดินด้วยการตรึงสารมลพิษไว้ที่รากพืช ทำให้สารมลพิษต่างๆ ภายในดินมีการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียรมากขึ้น และ/หรือเกิดการตกตะกอน กระบวนการดังกล่าวนี้จะสามารถช่วยลดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษภายในดินได้ และลดการเคลื่อนย้ายสารมลพิษลงไปสู่แหล่งน้ำใต้ดินหรือในอากาศได้ ดังรูปที่ 2.3(ค)

4) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (phytodegradation) เป็นการย่อยสลายสารมลพิษที่ปนเปื้อนโดยพืชจะดูดซับสารมลพิษเข้าไปในพืชแล้วย่อยสลายหรือเปลี่ยนแปลงสารมลพิษด้วยกระบวนการเมตาบอลิซึม (metabolism) ภายในพืช ทั้งนี้พืชจะสร้างสารประกอบต่างๆ เช่น

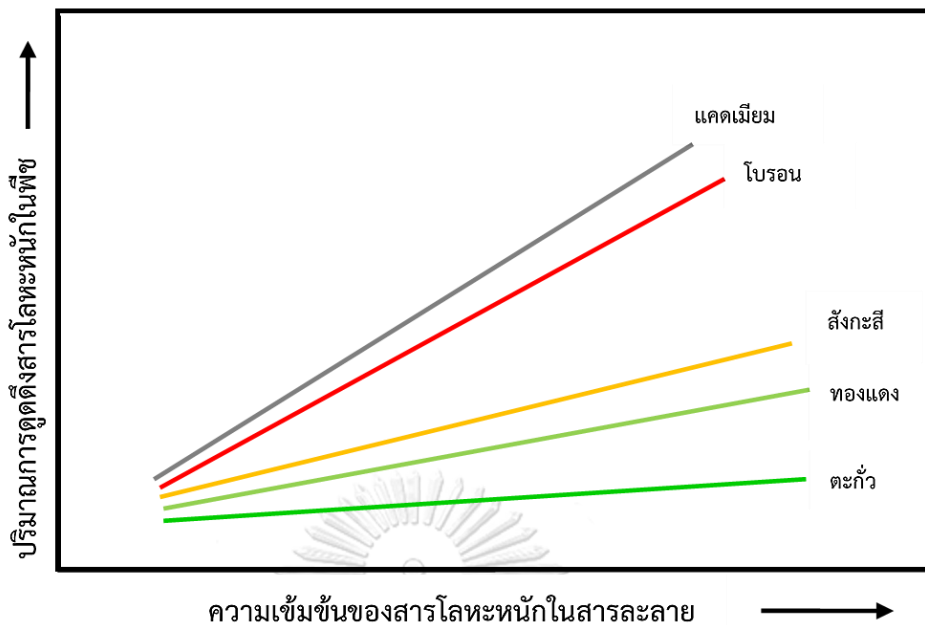
เอนไซม์ (enzymes) ขึ้นมาเพื่อย่อยสลายสารมลพิษที่อาจทำความเสียหายให้กับเนื้อเยื่อของพืชได้ หรือเปลี่ยนสารมลพิษให้เป็นสารที่แบคทีเรียสามารถย่อยสลายต่อไปได้ ดังรูปที่ 2.3(ง)

5) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช (rhizodegradation) เป็นการสลายตัวของสารมลพิษที่ปนเปื้อนในดินด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน โดยรากพืชที่ยังมีชีวิตจะมีการหลั่งสารออกมา กระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในดินหรือเชื้อราไมคอร์ไรซา ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารมลพิษได้ดีขึ้น เช่น ยีสต์ รา และแบคทีเรีย สามารถใช้หรือย่อยสลายสารมลพิษได้โดยการใช้สารมลพิษเป็นอาหารในการดำรงชีพ นอกจากนี้จุลินทรีย์ยังสามารถช่วยย่อยสลายสารมลพิษที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมให้มีความเป็นพิษที่น้อยลงได้เช่นกัน โดยพืชจะทำการปล่อยน้ำตาล แอลกอฮอล์ และกรด ซึ่งจะไปยังอินทรีย์คาร์บอน (organic carbon) ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ ให้เกิดการกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ (biodegradation) ซึ่งเป็นตัวช่วยทำให้ดินมีความร่วนซุยเพิ่มมากขึ้น และมีการเคลื่อนย้ายออกซิเจนกับน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.3จ

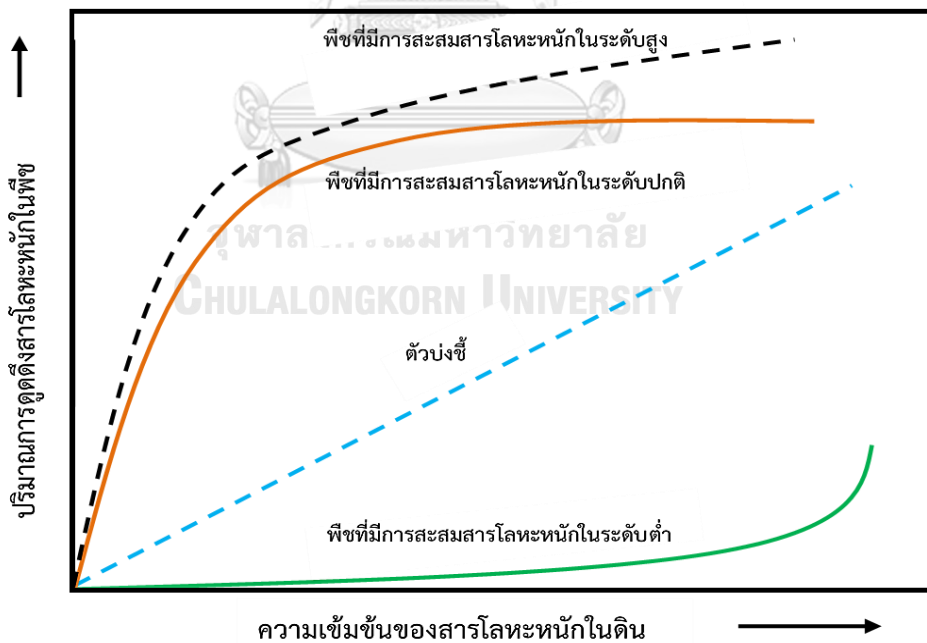
6) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช (phytovolatilization) เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการเป็นสื่อช่วยให้เกิดการเคลื่อนย้ายสารมลพิษปนเปื้อนที่มีอยู่ในดินหรือในน้ำออกไปสู่บรรยากาศ phytovolatilizationจะเกิดขึ้นตามการเจริญเติบโตของพืชที่มีการดูดดินน้ำที่มีสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ปนเปื้อนเข้าไปยังใบพืช และเกิดการระเหยกลายเป็นไอออกไปสู่บรรยากาศที่มีความเข้มข้นของสารมลพิษในระดับต่ำ หรือเป็นการทำให้สารมลพิษที่มีความสามารถในการระเหยได้ขึ้นมาจากดินโดยแรงดูดดึงจากการคายน้ำแล้วปล่อยออกทางใบ วิธีการบำบัดนี้สารมลพิษเมื่ออยู่ในรูปที่เป็นไอระเหยจะมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตน้อยลง ดังรูปที่ 2.3(ฉ)

2.2.2 ศักยภาพของพืชในการดูดดึงโลหะหนัก (phytoavailability)

ศักยภาพของพืชในการดูดดึงโลหะหนัก คือ ศักยภาพของสิ่งมีชีวิตในการดูดดึงสารเคมีจากสิ่งแวดล้อม โดยสารดังกล่าวอาจมีความสัมพันธ์กับกระบวนการสังเคราะห์แสงหรือเจริญเติบโตของพืช (Campbell, 1995) โดยเฉพาะสารเคมีที่มีปฏิกิริยาตอบสนองกับกระบวนการทางชีวภาพของสิ่งมีชีวิต (Vangronsveld and Cunningham, 1998) ซึ่งมีงานวิจัยของ Alloway (1995) ที่ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของโลหะหนักในพืชพบว่า โลหะหนักที่สะสมในพืชมีแนวโน้มของการรวมตัวกับโปรตีน โดยมีการเคลื่อนที่ในท่อลำเลียงน้ำและท่อลำเลียงอาหารของพืช นอกจากนี้ยังพบว่า พืชมีความสามารถในการดูดดึง และสะสมแคดเมียม โบรอน (boron, B) สังกะสี ทองแดง (copper, Cu) และตะกั่ว แปรผันตรงกับความเข้มข้นของแคดเมียม โบรอน สังกะสี ทองแดง และตะกั่ว ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การดูดซับสารโลหะหนักในสารละลายด้วยพืช
ที่มา: Pendias and Pendias (2000); พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2558)



รูปที่ 2.6 การดูดซับสารโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินด้วยพืช
ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2558)

ปัญหาการปนเปื้อนของสารโลหะหนักจากภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม สู่สิ่งแวดล้อม มักส่งผลให้เกิดความตระหนักถึงการดูดซับ การสะสมทางชีวภาพ ความทนทาน รวมถึงความไวของพืชต่อโลหะหนัก และเป็นปัจจัยกระตุ้นให้มีการศึกษา ชนิด และสายพันธุ์ของพืชที่มีความสามารถในการเจริญเติบโตในพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้ดี และสามารถดูดซับโลหะหนักได้อย่างรวดเร็ว อาทิ พืชในวงศ์ Brassicaceae ที่โดยทั่วไปเป็นพืชที่มีความทนทานมากที่สุดในแง่ของการสะสมโลหะหนัก สำหรับการจำแนกประเภทของพืชด้านการสะสมโลหะหนักนั้น สามารถจำแนกพืชออกได้เป็น 3 กลุ่ม (Baker, 1987) คือ (ดังรูปที่ 2.6)

1) พืชกลุ่มที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักไปไว้ในส่วนต่างๆ ของพืชได้ในปริมาณต่ำ (excluders) เช่น หญ้าชูดาน (*Sorghum bicolor*) หญ้าโบรม (*Bromus pubescens*) และหญ้าเฟสคู (*Festuca pratensis*) เป็นต้น

2) พืชกลุ่มที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักไปไว้ในส่วนต่างๆ ของพืชได้ในระดับปกติ (indicators) เช่น ข้าวโพด (*Zea mays* L.) ถั่วเหลือง (*Glycine max* L.) ข้าวสาลี (*Triticum* L.) และข้าวโอ๊ต (*Avena sativa*) เป็นต้น

3) พืชกลุ่มที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักไปไว้ในส่วนต่างๆ ของพืชได้ในปริมาณสูง เช่น ผักกาดหอม (*Lactuca sativa* L.) ผักขม (*Spinacia oleracea* L.) ชาร์ต (*Beta vulgaris*) และยาสูบ (*Nicotiana tabacum* L.) เป็นต้น

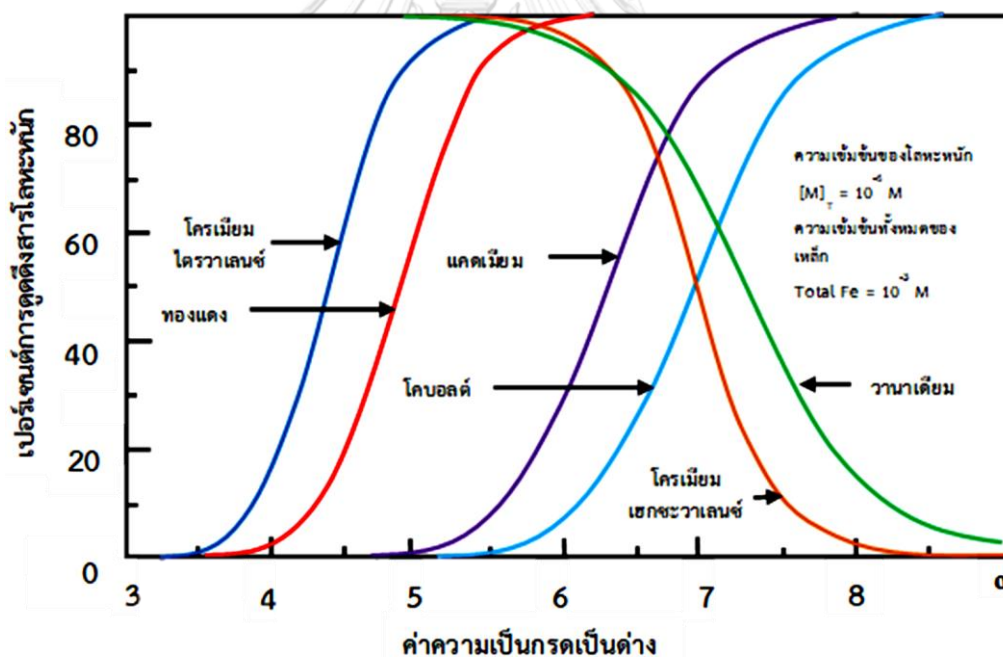
ทั้งนี้งานวิจัยของ Greger (1999) รายงานว่า พืชที่มีศักยภาพในการสะสมโลหะหนักในปริมาณมากเป็นพิเศษหรือที่เรียกว่า พืช hyperaccumulator ควรมีการสะสมโลหะหนักในใบพืชได้ในปริมาณที่สูง เช่น มีการสะสมแคดเมียมในใบได้มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของพืช มีการสะสมโคบอลต์ (cobalt, Co) ทองแดง และนิกเกิล ได้มากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของพืช และมีการสะสมแมงกานีส (manganese, Mn) และสังกะสี ได้มากกว่า 10,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของพืช เป็นต้น

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่และการสะสมทางชีวภาพของโลหะหนัก

1) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินหรือน้ำที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้การดูดซับโลหะหนักของพืชลดลง เนื่องจากไอออนของโลหะหนักต่างๆ ในรูปที่เปลี่ยนประจุได้และละลายน้ำได้จะมีปริมาณลดลงเมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้น อาทิ แคดเมียมสามารถเคลื่อนที่ได้ที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 4.5-5.5 ซึ่งสภาพละลายได้ (solubility) ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม และปริมาณอินทรีย์วัตถุ อย่างไรก็ตามในขณะที่สภาพแวดล้อมมีสถานะที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างสูงขึ้น จะพบว่า แคดเมียมเคลื่อนที่ได้มีน้อยหรือไม่เคลื่อนที่เลย ดังนั้นจึงทำให้การดูดซับของแคดเมียมโดยพืชลดลง ทั้งนี้ ค่าความเป็นกรดเป็นด่างจะส่งผลกระทบต่อการยึดเกาะของ

โลหะหนักในดิน หรืออนุภาคต่างๆ และเมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินมีค่าต่ำลงจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการยึดเกาะของโลหะหนักในดินลดลงตามไปด้วย ยกเว้นโลหะหนักกลุ่มที่มีประจุลบ อาทิ สารหนู โครเมียม และซีลีเนียม โดยมีการศึกษาของ Hodgson (1963) พบว่า ประสิทธิภาพการยึดเกาะกับอนุภาคดินของ โบรอน โคบอลต์ ทองแดง แมงกานีส และสังกะสี มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเป็นกรดเป็นด่างมีค่าประมาณ 5-8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นกรดเป็นด่างเป็นปัจจัยสำคัญในการศึกษาการดูดซับโลหะหนักด้วยพืช เพราะค่าความเป็นกรดเป็นด่างส่งผลโดยตรงต่อประจุที่ผิวของอนุภาค เช่น อนุภาคดิน อนุภาคสารอินทรีย์ในดิน และส่งผลต่อ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของโลหะชนิดอื่นๆ ในสิ่งแวดล้อมอีกด้วย รวมถึงประสิทธิภาพในการดูดซับประจุบวกในตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินเพิ่มขึ้น ดังแสดงรายละเอียดได้ดังรูปที่ 2.7 ทั้งนี้การศึกษาเทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนนั้นต้องคำนึงถึงค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่เหมาะสมในการปลูกพืช พบว่า อยู่ระหว่าง 6-7 แต่มีพืชบางชนิดที่มีความทนทาน และสามารถในการเจริญเติบโตในดินที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่ำกว่า 5.5 เช่น พืชตระกูลถั่วฝักยาว พืชตระกูลบลูเบอร์รี่ และพืชตระกูลกุหลาบพันปี เป็นต้น



รูปที่ 2.7 ผลของความเป็นกรดเป็นด่างต่อประสิทธิภาพของการดูดซับสารโลหะหนักในดิน
ที่มา: พันธวิศ สัมพันธ์พานิช (2558)

2) ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity; CEC)

ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวก เป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่ง ที่สามารถระบุได้ว่า โลหะหนักสามารถจะยึดเกาะกับตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมได้ดีหรือไม่ ซึ่งจะมีความสอดคล้องกับปริมาณอิทธิย

วัตถุ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็ก อลูมิเนียม และแมงกานีส รวมถึงสัดส่วนของอนุภาคดิน หรือชนิดของดิน ซึ่งส่วนประกอบของดินที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวก แตกต่างกันไปด้วย กล่าวคือ ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของอนุภาคดินเหนียว (clay) มีค่าสูงสุด รองลงมา คือ อนุภาคทรายแป้ง (silt) และอนุภาคทราย (sand) ตามลำดับ โดยทั่วไปดินที่มีค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงจะยึดเกาะกับโลหะได้ดีทำให้มีอัตราการแพร่กระจายต่ำ หากแต่ในดินที่มีค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงจะทำให้การบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโดยใช้พืชเป็นไปได้ยากขึ้นด้วย

3) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction potential, ORP)

ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ที่ผันแปรในดินเป็นผลมาจากกระบวนการหายใจของ จุลินทรีย์ดิน ดังนั้นเมื่อดินมีความชื้นต่ำการระบายอากาศดีจะทำให้จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนสามารถ เจริญเติบโตได้ดี โดยค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันอยู่ในช่วง 400 ถึง 700 มิลลิโวลต์ (Stieger and Feller, 1994) หากแต่เมื่อดินมีความชื้นสูง อัตราการหายใจมีมากกว่าอัตราการแพร่กระจาย ของออกซิเจนบนผิวดินลงสู่ในดิน จะทำให้ดินเริ่มขาดออกซิเจน ซึ่งเมื่อดินขาดออกซิเจนแล้วกลุ่ม จุลินทรีย์ที่สามารถใช้สารอื่นแทนออกซิเจนได้จะเป็นตัวรีดิวซ์ในกระบวนการหายใจ จึงทำให้ จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ และจะมีผลทำให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินต่ำลง และค่าความ ต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันลดลงเช่นกัน โดยค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันอาจลดลงต่ำถึง - 400 มิลลิโวลต์ จึงส่งผลให้ปริมาณโลหะหนักสามารถละลายในดินได้มากขึ้น และพืชสามารถดูดดึง โลหะหนักได้เพิ่มขึ้น (Muhammad et al., 2009)

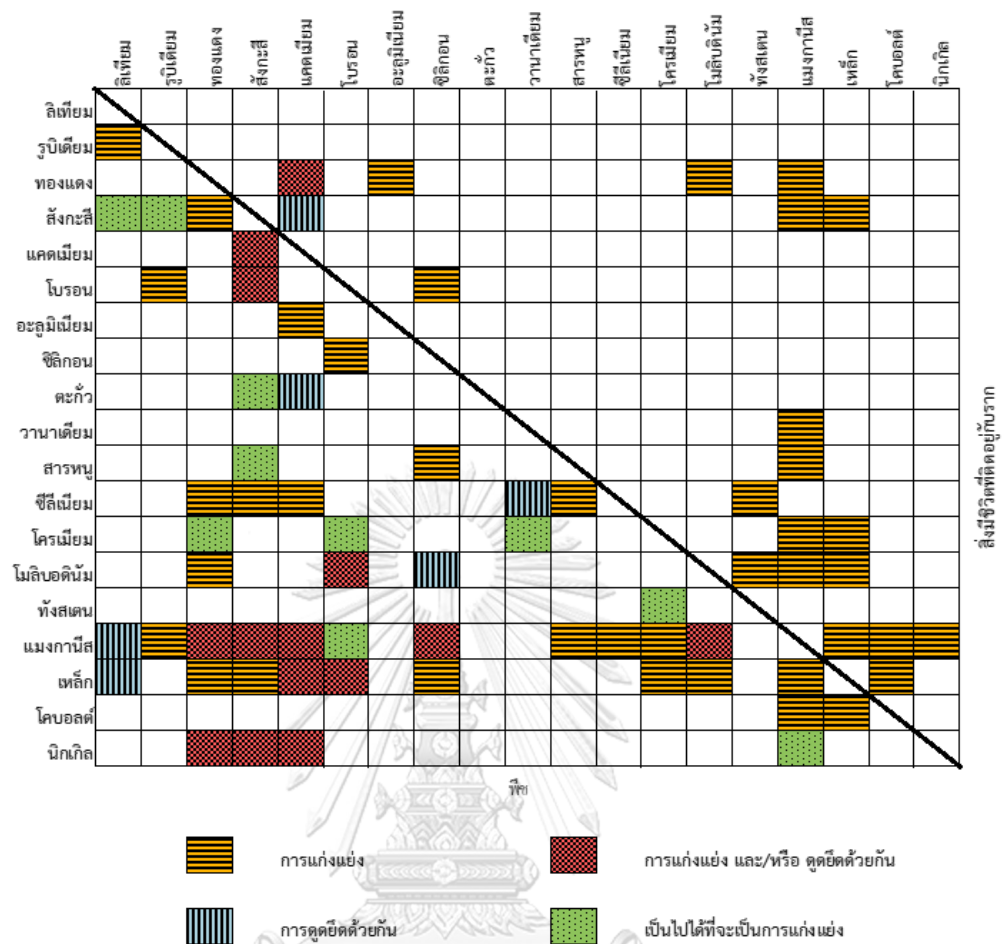
2.2.4 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลหะและองค์ประกอบอื่นๆ

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนัก และองค์ประกอบอื่นๆ ในพืช และในดินที่รากพืชที่สามารถ หยั่งรากถึง ซึ่งมีผลต่อกระบวนการดูดดึงโลหะหนักของพืชนั้นๆ (Pendias and Pendias, 2000; พันธวัช สัมพันธ์พานิช, 2558) ดังรูปที่ 2.8 โดยสามารถอธิบายถึงปฏิสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้

1) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างทองแดง และสังกะสี จะสังเกตโดยทั่วไปว่า โลหะหนักดังกล่าวนี้ จะ ถูกดูดดึงด้วยกลไกเดียวกัน ทั้งนี้โลหะหนักในแต่ละชนิดอาจมีการแก่งแย่งกัน เพื่อเข้ายับยั้งการดูดดึง ธาตุอาหารชนิดอื่นๆ ของรากพืชด้วย

2) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างทองแดง และแคดเมียม จะส่งผลต่อกระบวนการดูดดึงธาตุอาหารของ พืช และส่งผลทำให้เกิดของความเสียหายกับเนื้อเยื่อพืช (plant membrane) เนื่องจากสัดส่วนของ โลหะหนักขาดสมดุล

3) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสังกะสี และแคดเมียม พบว่า ค่อนข้างมีความขัดแย้งกัน เนื่องจาก องค์ประกอบในกระบวนการดูดดึง การเคลื่อนย้าย และการขนส่งของธาตุทั้ง 2 ชนิด แตกต่างกัน โดย พบว่า ธาตุสังกะสีจะช่วยลดการดูดดึงแคดเมียมทั้งระบบราก และใบพืชด้วย



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสารโลหะหนักในพีชและสิ่งมีชีวิตที่อยู่ติดกับรากพีช
ที่มา: พันธวิศ สัมพันธ์พานิช (2558)

2.2.5 ข้อดีและข้อจำกัดการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพีช

1) ข้อดี

- การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพีช เป็นเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมในการที่จะนำมาใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่บริเวณกว้าง เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างมีค่าใช้จ่ายต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับการบำบัดดินโดยวิธีการอื่นๆ เนื่องมาจากการเจริญเติบโตของพืชอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหลัก ไม่จำเป็นต้องทำการเคลื่อนย้ายดินออกจากพื้นที่ ทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ นอกจากนี้การบำบัดโดยวิธีนี้ยังมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อย และมีความปลอดภัยในการใช้มากกว่าการบำบัดโดยวิธีการอื่นๆ

- พืชกลุ่มที่มีความสามารถในการดูดดึงโลหะหนักไปไว้ในส่วนต่างๆ ของพืชได้ในปริมาณสูง นอกจากจะสามารถบำบัดโลหะหนักออกจากดินได้แล้ว ยังสามารถนำโลหะหนักที่สกัดได้จากมวลชีวภาพ (biomass) ไปผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่หรือนำเอาโลหะหนักที่ได้ไปขาย

ถือเป็นการเพิ่มคุณค่าในการทำ phytoextraction ทั้งนี้เนื่องจากการเผาผลาญชีวภาพจะได้พลังงานออกมา ซึ่งสามารถนำพลังงานที่ได้นี้มาใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อลดต้นทุนการผลิตได้เช่นกัน นอกจากนี้กำไรที่ได้จากการขายโลหะเหล่านี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นต้นทุนในการปลูกพืชในครั้งต่อไปได้อีกด้วย

- การปลูกพืชลงในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก ซึ่งพืชที่ปลูกนั้นจะสามารถช่วยลดการพังทลายของดิน (soil erosion) ช่วยป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนัก ช่วยลดการปนเปื้อนของโลหะหนักไปยังพื้นที่อื่นหรือลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะเป็นการช่วยลดความเสี่ยงในการที่โลหะหนักเหล่านี้จะเข้าสู่ตัวคนและสัตว์ได้ นอกจากนี้พืชที่ปลูกยังช่วยสร้างสารอินทรีย์ที่มีส่วนในการปรับปรุงบำรุงดินและเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดินด้วย และหากพืชที่นำมาใช้ในกระบวนการบำบัดมีความเหมาะสมกับพื้นที่ที่ทำการบำบัดแล้ว จะทำให้เกิดการแทรกซึมของสารอาหาร น้ำ ออกซิเจน และโลหะหนักในดินสู่พืชได้ดีขึ้น ส่งผลให้พื้นที่บำบัดมีสภาพดีขึ้น ร่มรื่น ทำให้เกิดทัศนียภาพที่สวยงามแก่ผู้พบเห็น นอกจากนี้พืชที่มีการสะสมของโลหะหนักเอาไว้ในปริมาณมากๆ จะช่วยทำให้พืชนั้นรอดพ้นจากการถูกกัดกินของแมลงหรือแมลงศัตรูพืช เช่น หนอนผีเสื้อ หรือช่วยลดการเกิดโรคจากเชื้อรา และแบคทีเรีย เป็นต้น

2) ข้อจำกัด

- การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช ไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดโลหะหนักที่อยู่ลึกกลงไปกว่าบริเวณรากพืชได้ นอกจากนี้หากโลหะหนักเหล่านั้นไม่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดดึงไปใช้ได้ก็จะไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารนั้นๆ ได้เช่นกัน

- การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช ถูกจำกัดไว้ด้วยสภาพทางธรณีวิทยา สภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิ ที่ตั้งของพื้นที่ปนเปื้อน ความสูงจากระดับน้ำใต้ดิน และความสามารถของเครื่องมือทางการเกษตร เป็นต้น

- ความสามารถในการบำบัดโลหะหนักของพืชแต่ละชนิดนั้นมีความแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาเพื่อคัดเลือกพืชที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดเป็นรายกรณีอีกทั้งในปัจจุบันพบว่า ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของพืชที่มีความสามารถในการบำบัดโลหะหนักยังมีข้อจำกัดอยู่มาก จึงมีความจำเป็นต้องมีการศึกษาค้นคว้าต่อไป

- การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืชนั้น ประสิทธิภาพของการบำบัดขึ้นอยู่กับความสามารถของพืช อีกทั้งยังใช้ระยะเวลาานาน จึงไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้แก้ปัญหการปนเปื้อนที่ต้องการการแก้ไขในระยะเวลายันสั้นได้

2.3 หญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum purpureum* C.V. mott)

หญ้าเนเปียร์แคระ มีชื่อสามัญว่า ดวาร์ฟเนเปียร์ (dwarf napier grass) ในสายพันธุ์ของหญ้าเนเปียร์ นอกจากหญ้าเนเปียร์แคระแล้ว ยังมีหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ต่างๆ ที่มีความนิยมปลูก

อีกหลายชนิด เช่น หญ้าเนเปียร์ธรรมดา หญ้าเนเปียร์ลูกผสม และหญ้าเนเปียร์ยักษ์ ทั้งหมดเป็นหญ้าที่ให้ผลผลิตสูงทั้งสิ้น หญ้าเนเปียร์แคะนำเข้ามาจากมหาวิทยาลัยแห่งรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยนายวิฑูรย์ กำเนิดเพชร เมื่อเดือนพฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2532 โดยนำมาปลูกไว้ที่องค์การส่งเสริมกิจกรรมโคนมแห่งประเทศไทย (อ.ส.ค.) โดยสามารถแสดงรายละเอียดข้อมูลหญ้าเนเปียร์แคะได้ดังนี้

อาณาจักร	: Plantae
ดิวิชั่น	: Anthophyta (Angiosperms)
ชั้น	: Monocotyledones
วงศ์	: Poaceae
สกุล	: Pennisetum
ชนิด	: <i>P. purpureum</i>
พันธุ์	: <i>P. purpureum</i> C.V. mott

2.3.1 ลักษณะทางกายภาพ

หญ้าเนเปียร์แคะ เป็นหญ้าที่มีอายุหลายปี มีลำต้นใต้ดินเป็นแบบเหง้า (rhizome) ๗ มีลักษณะทรงต้นเป็นกอพุ่ม ลำต้นเดี่ยว และอวบกว่าหญ้าเนเปียร์ธรรมดา มีความสูงประมาณ 170 - 180 เซนติเมตร มีการแตกกอดี มีสัดส่วนมวลชีวภาพของใบมากกว่าส่วนของลำต้น มีลักษณะกอตั้งตรง แตกกอได้ดี มีข้อถี่ปล้องสั้น ดังรูปที่ 2.9 สามารถทนแล้งได้ดี มีระบบรากที่แข็งแรง หยั่งลึกลงในดิน และยังมีความสามารถในการดูดธาตุอาหารได้มากทำให้เจริญเติบโตได้ดี หญ้าเนเปียร์แคะเจริญเติบโตได้ในดินหลายชนิด เช่น ดินร่วน ดินร่วนปนทรายถึงดินเหนียว ในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์จะเจริญเติบโตได้ดี เมื่อโตเต็มที่จะออกช่อดอกที่มีลักษณะยาวเรียวยาว เรียกว่าช่อดอกแบบ "spike" ช่อดอกมีสีเหลืองอ่อนยาวประมาณ 10 นิ้ว ตรงส่วนปลายของช่อดอกจะโค้งงอเล็กน้อย และเป็นหญ้าดอกที่ไม่ติดเมล็ด จึงไม่เป็นปัญหาวัชพืช เป็นพืชที่ชอบแสงเต็มที่ ดินอุดมสมบูรณ์ และไม่ชอบน้ำท่วมขัง การเตรียมดิน และการปลูกคล้ายคลึงกับอ้อย กล่าวคือ ปลูก 1 ครั้งสามารถเก็บเกี่ยวได้นาน 6-7 ปี และมีผลผลิตสูงเฉลี่ย 40-80 ตันสดต่อไร่ต่อปี

2.3.2 การขยายพันธุ์

หญ้าเนเปียร์แคะสามารถขยายพันธุ์ตลอดทั้งปี ถ้ามีการให้น้ำดี แต่โดยทั่วไปควรขยายพันธุ์ในช่วงต้นฤดูฝน ประมาณเดือนพฤษภาคม ถึง สิงหาคม

1) การเตรียมพื้นที่ปลูก: ควรมีการไถพรวนดินให้ร่วนซุยก่อน โดยการไถพรวน 2 ครั้ง ให้ไถครั้งแรกขณะที่ดินมีความชื้นพอเหมาะ เพื่อเปิดหน้าดิน และกำจัดวัชพืชที่ปกคลุมอยู่ให้หมดไป และไถพรวนครั้งที่ 2 เพื่อทำลายวัชพืชที่ขึ้นมาใหม่ พร้อมทั้งย่อยดินให้มีขนาดเล็กกลง และปรับสภาพแปลงหญ้าให้ราบเรียบ

2) การเตรียมท่อนพันธุ์หญ้าและการปักชำ: ต้นพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระที่จะนำมาใช้ทำท่อนพันธุ์ควรมีอายุประมาณ 4-6 เดือน นำมาตัดเป็นท่อน ท่อนพันธุ์แต่ละท่อนต้องมีข้อติดอยู่ 2-3 ข้อ ใช้ระยะปลูกร 75X75 เซนติเมตร การปลูกรให้ใส่ท่อนพันธุ์ลงในหลุมปลูก โดยให้ข้อล่างสุดฝังลงไปใต้ดินลึกประมาณ 2-3 นิ้ว

3) การใส่ปุ๋ย: ควรใส่ปุ๋ยคอกขณะเตรียมดินก่อนปลูกอย่างน้อย 15 วัน แล้วไถพรวนกลบสำหรับดินที่เป็นดินเหนียวที่มีระบบชลประทาน แนะนำให้ใส่ปุ๋ยคอกอัตรา 1 ตันต่อไร่ สำหรับดินร่วนปนทรายควรใส่ปุ๋ยคอก 2 ตันต่อไร่ หรือหว่านปุ๋ยวิทยาศาสตร์สูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ หลังจากนั้นจึงเริ่มปลูก เมื่อหญ้ามีอายุประมาณ 3-4 อาทิตย์ให้ใส่ปุ๋ยยูเรีย สูตร 46-0-0 ในอัตรา 20 กิโลกรัมต่อไร่ หว่านให้ทั่วทั้งแปลง ปกติแล้วจะทำการใส่ปุ๋ยหลังการตัดหญ้าทุกครั้ง

4) การให้น้ำ: หญ้าเนเปียร์แคระ เป็นพืชที่ตอบสนองต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน และการให้น้ำได้ดี สำหรับพื้นที่ที่เป็นดินเหนียว ควรให้น้ำในช่วงแล้งทุก 2-3 สัปดาห์ และให้น้ำทุกครั้งที่มีการใส่ปุ๋ย



รูปที่ 2.9 ลักษณะทางกายภาพของหญ้าเนเปียร์แคระ

ที่มา: http://natres.psu.ac.th/radio/radio_article/radio47-48/47-480042.htm

2.3.3 การใช้หญ้าเนเปียร์กับการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

หญ้าเนเปียร์ เป็นพืชที่มีระบบรากที่แข็งแรง และเจริญเติบโตได้ดี ในดินหลากหลายประเภท จึงเป็นพืชที่ได้รับความสนใจนำมาใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียม โดยมีรายงานการศึกษาของ Ishii et al. (2013) รายงานว่า หญ้าเนเปียร์เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม และมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมได้ดี (Sabeen et al., 2013) นอกจากนี้หญ้าเนเปียร์ ยังถูกระบุว่า เป็นพืชที่มีศักยภาพในการสะสมแคดเมียมที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่นๆ (Ishii et al., 2015)

นอกจากนี้ Abdel-Salam (2012) ได้ทำการศึกษาปัจจัยของการเติมสารคีเลต คือ อีดีทีเอ และดีทีพีเอ ต่อการกำจัดแคดเมียมจากดินเหนียวและดินทราย โดยใช้หญ้าเนเปียร์ ทานตะวัน และ ข้าวฟ่าง จากการศึกษารายงานผลว่า การใช้หญ้าเนเปียร์ร่วมกับการเติมสารอีดีทีเอสามารถช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพการดูดซับและสะสมแคดเมียมได้ดีที่สุด ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Abdel-Salam (2012) และ Santos et al. (2006) นอกจากนี้หญ้าเนเปียร์จะมีความสามารถในการดูดซับ แคดเมียมได้ในปริมาณที่สูงแล้วนั้น หากพิจารณาในเชิงการจัดการ จะพบว่า หญ้าเนเปียร์มีความ เหมาะสมเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากหญ้าเนเปียร์เป็นพืชที่ให้มวลชีวภาพสูง อีกทั้งในปัจจุบันรัฐบาล และ กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้ส่งเสริมสนับสนุนหญ้าเนเปียร์เป็นพืชพลังงาน โดยให้มีการ ส่งเสริมการปลูกหญ้าเนเปียร์เพื่อใช้เป็นพืชพลังงานทดแทน เมื่อวันที่ 16 กรกฎาคม 2556 นอกจากนี้ คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ ได้มีการกำหนดเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากหญ้าเนเปียร์ เป็น 3,000 เมกะวัตต์ภายใต้แผนพัฒนาพลังงานทดแทนระยะ 10 ปี (พ.ศ. 2555-2564) ด้วย

2.4 การปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

การปลูกพืชไร้ดินหรือไฮโดรโพนิกส์ ดังรูปที่ 2.10 มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก 2 คำ คือ คำว่า “Hudoor” ซึ่งแปลว่า “น้ำ” และ คำว่า “Ponos” ซึ่งแปลว่า “แรงงานหรือการทำงาน” เมื่อรวม ความหมายเข้าด้วยกัน จึงหมายถึง “การปฏิบัติงานที่มีความเกี่ยวข้องกับน้ำ” ไฮโดรโพนิกส์ เป็น เทคนิคการปลูกพืชแบบหนึ่งที่ไม่ใช้ดิน หรือสามารถปลูกได้ในอากาศที่มีการควบคุมความชื้นให้มีความเหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของรากพืช หรือปลูกในน้ำที่มีการเติมสารละลายธาตุอาหาร โดย ต้องมีการควบคุมการไหลเวียนของอากาศที่เหมาะสม หรือปลูกในวัสดุปลูกอื่น อาทิ ทราย กรวด หิน ลอยน้ำ ฟางข้าว และแกลบ เป็นต้น (Amataita, 2003; Waller and Yitayew, 2016)

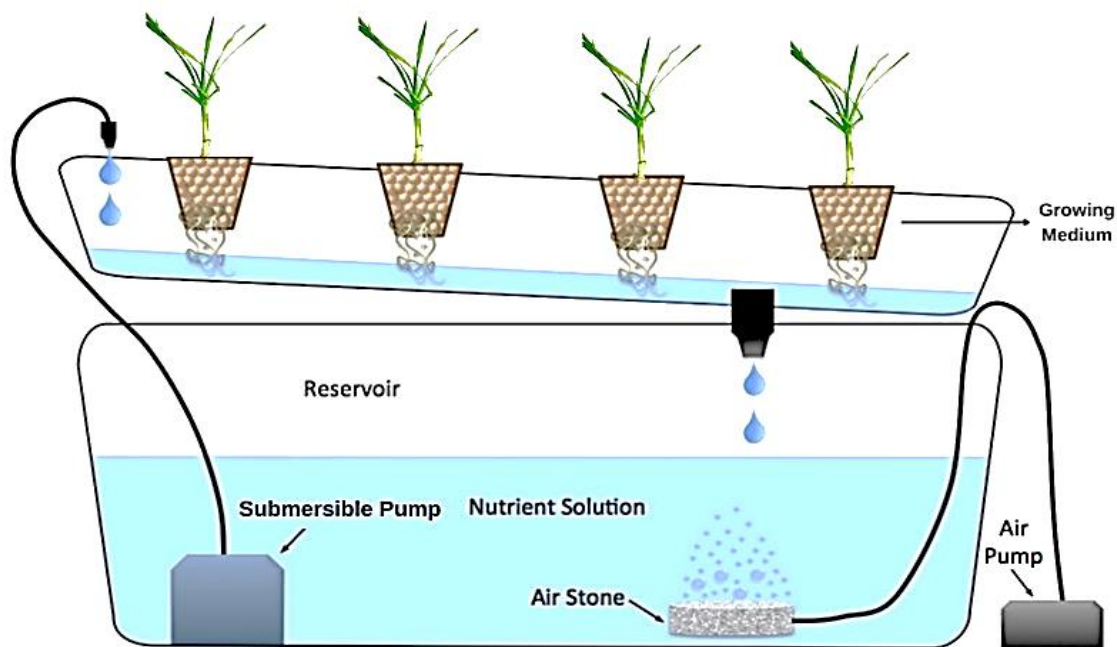
2.4.1 ประเภทของการปลูกพืชไร้ดิน

ระบบการปลูกพืชไร้ดิน สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ (Son et al., 2016) คือ

1) การปลูกพืชแบบให้รากสัมผัสกับน้ำ (water culture) เป็นการปลูกพืชที่รากพืชจะเจริญเติบโตในสารละลายธาตุอาหารโดยตรง ซึ่งมีหลายรูปแบบการปลูก อาทิ การปลูกแบบระบบให้ สารละลายธาตุอาหารไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นบางๆ บนรางปลูกแบบต่อเนื่อง (nutrient film technique; NFT) การปลูกแบบระบบให้สารละลายธาตุอาหารพืชไหลผ่านรากพืชแบบหนาบนราง ปลูกแบบต่อเนื่อง (nutrient flow technique; NFLT) และการปลูกแบบระบบให้สารละลายธาตุ อาหารไหลผ่านรากพืชในรางปลูกระดับลึก (deep flow technique; DFT)

2) การปลูกพืชในวัสดุที่ไม่ใช่ดิน เป็นการปลูกที่ต้องการให้รากพืชเจริญเติบโตในวัสดุปลูก ชนิดต่างๆ ที่เป็นของแข็ง วัสดุที่ใช้จะเป็นวัสดุที่มีธาตุอาหารน้อยหรือไม่มีอยู่เลย และมีการเติม สารละลายธาตุอาหารให้กับพืชทั้งในรูปสารละลาย และในรูปปุ๋ยเม็ด ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้ส่วนใหญ่

ต้องสามารถกักเก็บความชื้นได้ดี มีความสามารถในการระบายน้ำสูง อัตราการย่อยสลายต่ำ ดังตัวอย่างวัสดุปลูก เช่น ทราย กรวด และแผ่นฟองน้ำ เป็นต้น



รูปที่ 2.10 การปลูกพืชไร้ดิน (hydroponics)
ที่มา: ดัดแปลงจาก Son et al. (2016)

2.4.2 ข้อดีและข้อจำกัดของการปลูกพืชไร้ดิน (Son et al., 2016)

1) ข้อดีของการปลูกพืชไร้ดิน

- สามารถปลูกพืชได้ในบริเวณที่ดินไม่เหมาะสมแก่การเพาะปลูก เช่น ดินเปรี้ยว ดินเค็ม และดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ เป็นต้น
- ใช้พื้นที่ปลูกน้อย และสามารถได้ผลผลิตอย่างสม่ำเสมอ
- ประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการเตรียมพื้นที่ปลูก และกำจัดวัชพืชต่ำ
- ประสิทธิภาพในการให้ปุ๋ยและน้ำสูง
- ลดปัญหาศัตรูพืชที่มาจากดินได้ ทำให้ปลูกพืชชนิดเดิมได้เป็นเวลานาน ปราศจากการระบาดของโรคพืช
- สามารถบริหารจัดการ และควบคุมสภาวะที่เหมาะสมที่พืชเจริญเติบโตได้ดี ได้แก่ ปริมาณธาตุอาหาร ความเป็นกรดเป็นด่าง และระดับความเข้มข้นของออกซิเจนได้

2) ข้อจำกัดของการปลูกพืชไร้ดิน

- ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง และเริ่มต้นระบบค่อนข้างสูง

- ต้องอาศัยผู้ปลูกที่มีประสบการณ์ในการจัดการปลูกพืช และการวางแผนการให้ธาตุอาหารพืช
- ได้รับผลกระทบได้ง่าย และรวดเร็วหากพื้นที่ปลูกมีสภาพไม่เหมาะสม
- ต้องดูแลเอาใจใส่อย่างสม่ำเสมอ

2.4.2 การประยุกต์ใช้วิธีการปลูกพืชไร่นาร่วมกับวิธีการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยพืช

การบำบัดและฟื้นฟูตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมนับว่าเป็นวิธีการที่น่าสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การศึกษาอิทธิพลของสารต่างๆ ที่เติมลงไปเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับและสะสมสารโลหะหนัก การศึกษากลไกการเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของโลหะหนัก จึงนิยมใช้การปลูกพืชแบบไร่นา รวมถึงการศึกษาโดยใช้พืชน้ำเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำ เช่น การศึกษาของ Sampanpanish et al. (2007) ได้ศึกษาการสะสมโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ใน ผักตบชวา และแวนแก้ว โดยการปลูกพืชแบบไร่นา ซึ่งการศึกษาดังกล่าวพบว่า พืชทั้งสองชนิดมีการสะสมโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ได้ดี โดยเฉพาะผักตบชวา และยังพบการสะสมโครเมียมมีความเข้มข้นสูงบริเวณราก และพืชมีการเปลี่ยนรูปฟอร์มของโครเมียมบริเวณรากของพืชทั้งสองชนิดด้วย นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Sampanpanish and Hongpiriyakul (2018) ที่ทำการศึกษากำจัดตะกั่วจากน้ำที่มีการปนเปื้อนตะกั่วโดยต้นบอนเขียว และพบว่าบอนเขียวสามารถดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดี และบอนเขียวมีการสะสมตะกั่วบริเวณรากได้สูงกว่าบริเวณอื่นๆ

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาที่ปลูกพืชในลักษณะไร่นา เพื่อศึกษาปัจจัยของการเติมสารคีเลต และสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ อิติทีเอ ซิตริกแอซิด ดีทีพีเอ ต่อการสะสมแคดเมียมในพืชที่ปลูกแบบไร่นา (Kongmuang and Sampanpanish, 2010; Tananonchai and Sampanpanish, 2014) จากการศึกษาดังกล่าว พบว่า สารอิติทีเอส่งผลดีที่สุดต่อการสะสมแคดเมียมในพืช และการศึกษาของ Sampanpanish and Pinpa (2017) ที่พบว่า นอกจากการเติมสารอิติทีเอแล้ว ค่าความเป็นกรดเป็นด่างยังมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับและสะสมแคดเมียมในผักตบชวาที่เป็นพืชทดลอง โดยเฉพาะค่าความเป็นกรดเป็นด่าง เท่ากับ 5 ที่ทำให้พืชทดลองมีการสะสมแคดเมียมได้ดีที่สุด ทั้งนี้ยังมีการประยุกต์ใช้วิธีการปลูกพืชไร่นาเพื่อบำบัดสารโลหะหนักในน้ำท่าที่ไหลผ่านพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของสารโลหะหนักโดยใช้ nutrient film technique (NFT) ผลการศึกษา พบว่า ผักกาดหอม (*Lactuca sativa*) ที่เป็นพืชทดลองสามารถเจริญเติบโตได้ดี และมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม นิเกิล ตะกั่ว และสังกะสี มีค่ามากกว่า 92, 85, 60, และ 60 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และมีการแนะนำให้ใช้วิธีการดังกล่าวในการบำบัด และแก้ไขปัญหาต่อไป โดยเปลี่ยนจากผักกาดหอมที่เป็นพืชอาหารเป็นไม้ดอกที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจต่อไป (Rababah and Al-Shuha, 2009) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเติมสารคีเลต ได้แก่ อิติทีเอ และเอทิลีนไดเอมีนดีซัคซินิกแอซิด (อิติทีเอเอส; ethylenediamine-N,N'-disuccinic acid; EDDS) ร่วมกับวิธีการปลูกพืชไร่นาเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการสะสมแคดเมียมในพืชทดลองที่เป็นไม้ยืนต้น คือ ต้นยูคาลิปตัส (*Eucalyptus*

camaldulensis) ซึ่งเป็นไม้ที่อัตราการเจริญเติบโตสูง เป็นเวลา 3 สัปดาห์ ในสารละลายแคดเมียมซัลเฟต (cadmium sulfate; CdSO₄) ผลการศึกษาพบว่า ต้นยูคาลิปตัส มีการสมโลหะหนักได้สูงสุด บริเวณราก มีค่าความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารโลหะหนัก (translocation factor, TF) ต่ำ (Pietrini et al., 2015)

2.5 สารคีเลต (Chelating agent)

สารคีเลต คือ สารอินทรีย์และอนินทรีย์เคมีซึ่งสามารถจะรวมตัว และค้ำกันไม่ให้มีการตกตะกอนของพวกประจุบวกบางชนิดได้ สารคีเลตมีกรวมตัวกับโลหะหนักแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนปฏิกิริยารวมนี้เรียกว่า chelation และผลที่ได้จากปฏิกิริยานี้เรียกว่า สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) หรือ สารประกอบโคออร์ดิเนชัน (coordination compound) ซึ่งเป็นสารที่มีผลต่อการดูดดึงของพืช (Speight, 2017) นอกจากนี้สารคีเลตยังเป็นสารเคมีที่สามารถรวม และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการตกตะกอนของประจุบวกบางชนิดรวมถึงจุลธาตุ เช่น แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และตะกั่ว เป็นต้น โดยสารคีเลตจะเข้าล้อมรอบประจุบวกที่เป็นโลหะ (metallic cation) และไม่ยอมให้สารอื่นเข้ามาสร้างพันธะกับประจุบวกเหล่านี้ โดยประจุบวกที่มีสารคีเลตล้อมรอบจะคงอยู่ในสภาพสารละลายได้นาน และมีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าประจุบวกธรรมดาทำให้พืชสามารถดูดดึงไปใช้ได้ง่ายขึ้น สำหรับสารคีเลตที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย (Razuvaev et al., 1971) ได้แก่ เอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด ไดเอทิลีนไตรเอมีนเพนตะอะซิติกแอซิด (ดีทีพีเอ; diethylenetriaminepentaacetic acid; DTPA) และเอทิลีนไดเอมีนดีซัคซินิกแอซิด เป็นต้น

2.5.1 ประเภทของสารคีเลต

สารคีเลตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก (Evangelou et al., 2007; Speight, 2017) ได้แก่

1) สารอินทรีย์ธรรมชาติ เช่น เอทิลีนไดเอมีนดีซัคซินิกแอซิด และไนทริโลไตรแอซิดิก (nitrilotriacetic acid; NTA) นอกจากนี้มีการแบ่งสารอินทรีย์ธรรมชาติออกจากสารกลุ่ม 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) และกรดฟูลวิก (fulvic acid; FA) เป็นต้น

2) สารคีเลตสังเคราะห์ เช่น เอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด ไฮดรอกซีเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด (hydroxylethylene tetraacetic acid; HEDTA) ไดเอทิลีนไตรเอมีนเพนตะอะซิติกแอซิด เอทิลีนไกลิโคเตตระอะซิติกแอซิด (Ethylene glycol tetraacetic acid; EGTA) เอทิลีนไดเอมีนไดโอไฮดรอกซีฟีนิลแอซิด (Ethylene diamine di-o-hydroxyphenyl acid;

EDDHA) และไดไฮดรอกซิลฟีนิลอิมิโนไดอะซิติกแอซิด (N-(2-hydroxyphenyl) iminodiacetic acid; HEIDA) เป็นต้น

2.5.2 สารคีเลตต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมแคดเมียมในพืช

การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโดยพืช มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความลึกของสารปนเปื้อนในดิน อัตราการเคลื่อนที่ของโลหะจากรากสู่ยอดต่ำ และรูปฟอร์มของสารโลหะหนักที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ เป็นต้น (Baker et al., 2000) จึงมีการวิจัยที่มุ่งเน้น การเพิ่มปริมาณการสะสมโลหะหนักในพืชด้วยวิธีการต่างๆ ร่วมกัน ทั้งนี้การเติมสารคีเลตก็นับเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมสารโลหะหนักในพืชได้ดี และยังเป็นแนวทางที่มีความเหมาะสมต่อการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก สำหรับการเติมสารคีเลตในปริมาณน้อยๆ ของการปลูกพืช สามารถช่วยลดระดับความเป็นพิษของโลหะหนักในพืชลงได้ เช่น การใช้สารคีเลตที่สังเคราะห์ ได้แก่ อิติทีเอ และ ดีทีพีเอ (Evangelou et al., 2007) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Abdel-Salam (2012) ที่ศึกษาผลของสารอิติทีเอ และสารดีทีพีเอ ต่อการกำจัดแคดเมียมจากดินเหนียว และดินทรายโดยใช้พืช 3 ชนิด ได้แก่ หญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum purpureum*) ต้นทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) และข้าวฟ่าง (*Sorghum bicolor* L.) พบว่า หญ้าเนเปียร์ มีประสิทธิภาพสูงสุดในการสะสมแคดเมียม นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมสารคีเลต โดยเฉพาะสารอิติทีเอ มีส่วนสำคัญในการเพิ่มปริมาณการสะสมแคดเมียมในพืชและลดความเป็นพิษของแคดเมียม ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Santos et al. (2006) ที่ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารอิติทีเอ และสารอิติดีเอส ต่อการดูดซับแคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว ด้วยพืช *Brachiaria decumbent* โดยผลของการศึกษาพบว่า สารอิติทีเอ ช่วยลดระดับความเป็นพิษจากแคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว ได้ และยังพบว่า สารอิติทีเอ และสารอิติดีเอส ส่งผลให้พืช *Brachiaria decumbent* เจริญเติบโตได้ดีในดินที่ปนเปื้อน และมีอัตราการเพิ่มมวลชีวภาพสูงขึ้น

สารคีเลตสามารถช่วยลดความเป็นพิษของโลหะหนักในพืชลง และยังเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากสู่ยอดอีกด้วย อาทิ การศึกษาของ Chen et al. (2004) ที่ศึกษาผลของสารอิติทีเอต่อการดูดซับโลหะหนักด้วยหญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) โดยในการศึกษาดังกล่าวใช้ดินที่ปนเปื้อนสารโลหะหนัก (ตะกั่ว 3.7 เปอร์เซ็นต์ ทองแดง 15.6 เปอร์เซ็นต์ สังกะสี 14.3 เปอร์เซ็นต์ และแคดเมียม 22.2 เปอร์เซ็นต์) ผลการศึกษา พบว่า สารอิติทีเอสามารถช่วยเพิ่มการเคลื่อนย้ายตะกั่ว ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม ในการทดลองกับหญ้าแฝกได้ จากการศึกษาดังกล่าว มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Lai and Chen (2005) ที่ทำการศึกษาความสามารถของสารอิติทีเอ ในการดูดซับแคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว ในดินด้วยหญ้าสีรุ้ง (*Rainbow pink*) และหญ้าแฝก (vetiver grass) ที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สังกะสี 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และตะกั่ว 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ผลการทดลองพบว่า ในชุดที่มีการเติม

สารอีดีทีเอ นั้นมีการสะสมแคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว ในส่วนเหนือดินเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.5.3 ปัจจัยในการเลือกใช้สารคีเลต

การนำสารคีเลตมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดสารโลหะหนักด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อให้เกิดความคุ้มค่า และมีประสิทธิภาพสูงสุดควรคำนึงถึง 3 ปัจจัย ดังนี้ (Lee and Sung, 2014)

1) สารคีเลตที่นำมาใช้ประโยชน์ ควรเป็นสารที่ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียรสูง ในช่วงสภาวะความเป็นกรดเป็นด่างที่กว้าง และมีอัตราส่วนโมลระหว่างโลหะหนักและลิแกนด์ในอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 โมล

2) สารคีเลตที่นำมาใช้ประโยชน์ ควรเป็นสารที่มีค่าครึ่งชีวิตสูง และเมื่อจับตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารโลหะหนักแล้วมีอัตราการสลายตัวที่ต่ำ

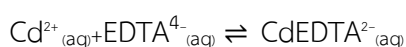
3) สารคีเลตที่นำมาใช้ประโยชน์ ควรเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำ และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อความปลอดภัยในการศึกษารวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้จริง

2.5.4 เอทิลีนไดเอมมีนเตตระอะซิติก

สารอีดีทีเอเป็นกรดอะมิโนคาร์บอกซิลิกชนิดโพลีอะมิโนคาร์บอกซิลิกซ์ (polyamino carboxylic acid) เป็นสารสังเคราะห์อยู่ในรูปของแข็งสีขาวที่ละลายน้ำได้ มีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.3 ตามกฎของลิวอิส สารอีดีทีเอมีประจุ 4 สามารถเกิดพันธะได้ 6 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.11 และประกอบด้วยกลุ่มอะมิโนแบบตติยภูมิจำนวน 2 กลุ่ม สามารถให้อิเล็กตรอนหาคู่ให้กับไอออนของโลหะ และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนบวกของโลหะหรือล่อมไอออนบวกของโลหะในอัตราส่วน 1:1 โมล เช่น แคลเซียม แคดเมียม และเหล็ก โดยไอออนบวกที่ถูกสารอีดีทีเอล้อมจะเกิดปฏิกิริยาได้ลดลง สารอีดีทีเอถูกผลิตในรูปแบบต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น อีดีทีเอไดโซเดียมซอร์ท (disodium salt EDTA) และแคลเซียมไดโซเดียมอีดีทีเอ (calcium disodium EDTA) สารอีดีทีเอเป็นกรดอ่อน จึงมีการแตกตัวหลายครั้ง โดยมีค่าคงที่ของการแตกตัวหลายค่า คือ $pK_{a1}=0.0$, $pK_{a2}=1.5$, $pK_{a3}=2.0$, $pK_{a4}=2.66$, $pK_{a5}=6.16$, และ $pK_{a6}=10.24$

1) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคดเมียมและสารอีดีทีเอ

สารอีดีทีเอถูกนำมาประยุกต์ใช้กำจัดแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมโดยอาศัยหลักการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนของโลหะและสารคีเลต ดังสมการที่ 2.3 โดยมีค่าคงที่สมดุลเคมี (chemical equilibrium constant: K) เท่ากับ 2.9×10^{16}



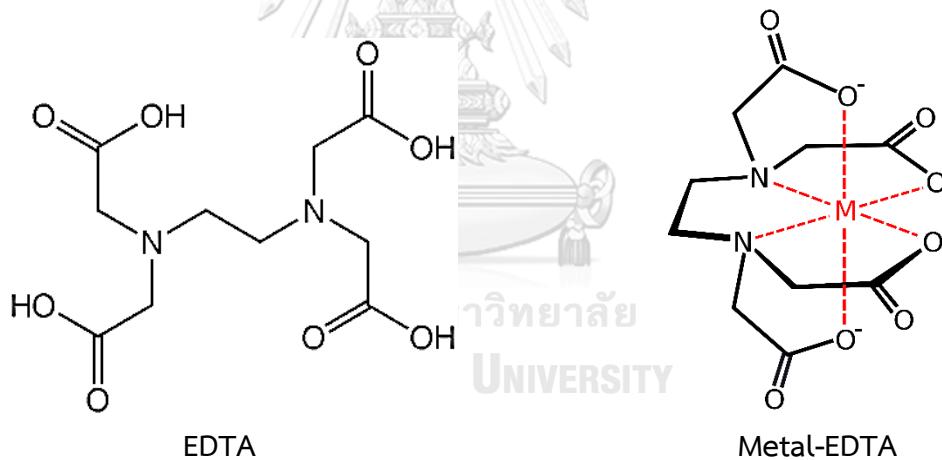
สมการที่ 2.3

ทั้งนี้จากสมการที่ระบุว่าสารอีดีทีเอมีประจุ 4^- อันเนื่องมาจากสารอีดีทีเอมีหลากหลายรูปฟอร์ม ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดเป็นด่าง หากแต่ในสภาวะปกติสารอีดีทีเอมีประจุลบ 4 ตำแหน่ง (Crisponi and Nurchi, 2016; Ramachandra and Narayana, 1997)

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของสารอีดีทีเอ

คุณสมบัติ	รายละเอียด
สูตรทางเคมี	$C_{10}H_{16}N_2O_8$
มวลโมเลกุล	292.25 กรัมต่อโมล
ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง	2.5-3.0
ความหนาแน่น	0.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	$240\text{ }^{\circ}\text{C}$
ค่า chelation value	3.39 มิลลิโมลต่อกรัม
ค่าการละลาย ที่ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.04 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

ที่มา: Crisponi and Nurchi (2016)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของอีดีทีเอ และโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะและสารอีดีทีเอ

ที่มา: Burgot (2012)

2) ประโยชน์ของสารอีดีทีเอ

2.1) ประโยชน์ของสารอีดีทีเอในอุตสาหกรรม

- การนำสารอีดีทีเอมาบำบัดความกระด้างของน้ำ (water hardness) เนื่องจากสารอีดีทีเอมีความสามารถในการจับกับแคลเซียม และแมกนีเซียมได้ดีทำให้ความกระด้างของน้ำลดลง

- การนำสารอีดีทีเอมากำจัดโลหะหนัก เพื่อลดความเสียหายอันเกิดจากไอออนลดการเกิดตะกอน และตะกรันในเครื่องจักรต่างๆ เช่น ในระบบน้ำหล่อเย็น เป็นต้น ทำให้ยากต่อการกำจัด และอาจสร้างความเสียหายได้ (Oviedo and Rodríguez, 2003)

- การนำสารอีดีทีเอมาถนอม รักษาอาหาร ผู้ผลิตอาหารหลายรายใช้สารอีดีทีเอ เพื่อกำจัดโลหะ เช่น ทองแดง นิกเกิล และเหล็ก ที่อาจเจือปนมาในอาหารระหว่างกระบวนการแปรรูป และการเก็บเกี่ยว ซึ่งโลหะดังกล่าวอาจเร่งการเน่าเสียของอาหาร และการสลายตัวโดยเร่งให้เกิดการออกซิเดชันของไขมันในอาหาร แม้ว่าโลหะจะยังคงอยู่ในอาหาร แต่สารอีดีทีเอจะไปล้อมไอออนของโลหะ เพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

2.2) ประโยชน์ของสารอีดีทีเอในด้านสิ่งแวดล้อม (Nowack, 2008)

- การนำสารอีดีทีเอมาบำบัดสารโลหะหนักที่ปนเปื้อนหรือรั่วไหลออกสู่สิ่งแวดล้อม หรือบำบัดการปนเปื้อนสารโลหะหนักในน้ำบาดาล อันก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์ แม้ว่าพันธะที่เกิดจากสารอีดีทีเอ และโลหะหนักจะไม่เสถียร เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ แต่ก็ยังสามารถให้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำใต้ดิน และดินได้เป็นอย่างมาก

2.3) ประโยชน์ของสารอีดีทีเอในด้านการแพทย์ (Mendes et al., 2015)

- การนำสารอีดีทีเอมาใช้เพื่อลดระดับแคลเซียมในเลือดที่อันตราย นอกจากนี้สารอีดีทีเอ มักถูกใช้กับบุคคลที่เป็นโรคหัวใจเพื่อเพิ่มการหดตัว และลดอัตราการเต้นของหัวใจ

- การนำสารอีดีทีเอมาใช้เพื่อขับสารโลหะหนักออกจากร่างกาย ในกรณีที่ผู้ป่วยได้รับสารโลหะหนักเข้าสู่ร่างกาย เช่น มีสารตะกั่ว เหล็ก สารหนู และปรอท ในปริมาณสูงสามารถใช้สารอีดีทีเอ เพื่อบรรเทาอาการได้

3) การสลายตัวและค่าครึ่งชีวิตของสารอีดีทีเอ

ปัจจุบันได้มีการศึกษาการสลายตัว และค่าครึ่งชีวิตของสารอีดีทีเอ โดยมีปัจจัยต่างๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง อาทิ การศึกษาของ Ginkel et al. (1999) ศึกษาการสลายตัวของสารอีดีทีเอ ในน้ำจากแม่น้ำ และทะเลสาบ ซึ่งเป็นการทดลองในขวดแบบระบบปิด โดยเติมสารโซเดียมอีดีทีเอ (Na_2EDTA) ที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับของความเป็นกรดเป็นด่างที่ 6.5 และ 8.0 ผลการศึกษาพบว่า ระดับความเป็นกรดเป็นด่าง 6.5 ที่ระยะเวลา 28 วัน ไม่พบการย่อยสลายของสารอีดีทีเอ หรือพบการย่อยสลายเพียงเล็กน้อยประมาณ 2-12 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเวลาผ่านไปเป็น 49 วัน พบว่า การย่อยสลายของสารอีดีทีเอ มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 60-83 เปอร์เซ็นต์ และสารอีดีทีเอที่ระดับความเป็นกรดเป็นด่าง 8.0 ที่ระยะเวลา 28 วัน มีค่าการย่อยสลายของสารอีดีทีเอเท่ากับ 53-72 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการทดลองผ่านไป 35 วัน พบค่าการย่อยสลายของสารอีดีทีเอเท่ากับ 75-89 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การศึกษาของ Meers et al. (2005) ได้ทำการศึกษาการสลายตัว และค่าครึ่งชีวิตของสารอีดีทีเอ และอีดีทีเอ โดยการใช้สารอีดีทีเอ ที่ระดับความเข้มข้น 0.8, 1.6 และ 4 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และทำการศึกษาเป็นระยะเวลา 40 วัน ผลการศึกษาพบว่า การเติมสารอีดีทีเอ ที่ระยะเวลา 40 วัน ไม่พบการลดลงของสารอีดีทีเออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และจากการศึกษาดังกล่าวได้นำข้อมูลไปคำนวณ และประมาณค่าครึ่งชีวิตของสารอีดีทีเอได้เท่ากับ 36 วัน

4) ความเป็นพิษของสารอิตาลีเอ (Mendes et al., 2015)

สารอิตาลีเอ ไม่มีพิษร้ายแรงต่อสุขภาพของมนุษย์ หากแต่หายใจเอาละอองหรือฝุ่นของสารอิตาลีเอเข้าไปก็อาจทำให้ไอหรือจามได้ การสัมผัสกับผิวหนังหรือลูกตามีผลเพียงทำให้ผิวหนังที่สัมผัสเกิดการระคายเคืองเท่านั้น แต่ถ้าหากมีการกินหรือกลืนเข้าไปจะทำให้รู้สึกร้อนในระบบทางเดินอาหารและกระเพาะ ส่งผลให้คลื่นไส้อาเจียน และหากได้รับในปริมาณมากอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของไตได้ ทั้งนี้การใช้สารอิตาลีเอ เพื่อขับสารโลหะหนักในร่างกายโดยใช้สารอิตาลีเออย่างส่งผลให้เกิดภาวะที่ร่างกายขาดโลหะที่จำเป็นอื่นไปด้วย แต่การศึกษาในระยะสั้นหลายฉบับซึ่งได้รับการตรวจสอบจาก FAO / WHO ในปีพ. ศ. 2517 ที่ได้ทำการศึกษาค่าความเป็นพิษของสารอิตาลีเอในสัตว์ทดลอง ได้รายงานว่ามีผลข้างเคียงใดๆ จากการใช้สารอิตาลีเอในระดับ 5เปอร์เซ็นต์ต่อวันในหนูทดลอง โดยตรวจเป็นประจำทุกวัน และเป็นเวลาหลายสัปดาห์ พบอาการอุจจาระร่วง และการกินอาหารที่ลดลงในสัตว์ที่ได้รับสารอิตาลีเอในระดับ 5 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามยังมีความผิดปกติกล่าวคือ หนูทดลองมีน้ำหนักลดลง และมีภาวะขาดธาตุอาหาร

ความเป็นพิษของสารอิตาลีเอต่อพืช เช่น การศึกษาของ Hernandez-Allica et al. (2007) ซึ่งได้ทำการศึกษาค่าผลของสารอิตาลีเอต่อการดูดตั้งโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม และความเป็นพิษต่อพืชของสารอิตาลีเอที่ 4 ระดับความเข้มข้น คือ 0, 250, 500 และ 750 ไมโครโมล โดยทำการทดลองแบบปลูกพืชไร้ดิน ซึ่งพืชที่ใช้ในการศึกษาคือ *Cynara cardunculus* L. มีระยะเวลาที่ใช้เก็บตัวอย่าง คือ 48 ชั่วโมงหลังจากปลูกพืชในน้ำเสียสังเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อระดับความเข้มข้นของสารอิตาลีเอมากขึ้น พืชมีแนวโน้มแสดงความเป็นพิษมากขึ้นด้วย เช่น ลดการปิดเปิดของปากใบ ลดอัตราการหายใจ ลดการระเหย และลดการจุน้ำของพืช เป็นต้น

5) การประยุกต์ใช้สารอิตาลีเอกับการฟื้นฟูป่าที่ปนเปื้อนด้วยพืช

สารอิตาลีเอ ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในวงการแพทย์ และการศึกษาฟื้นฟูป่าที่ปนเปื้อนสารโลหะหนัก สารคีเลตถูกนำมาใช้เป็นสารชักนำให้มีการเพิ่มปริมาณการสะสมของโลหะในพืชได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งนับว่าเป็นการช่วยลดการปนเปื้อนโลหะหนักในดินและน้ำได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการเติมสารประกอบเชิงซ้อนในปริมาณน้อยๆ ตลอดระยะเวลาการเจริญเติบโตของพืชชั้นนั้นมีส่วนสำคัญในการช่วยลดความเป็นพิษของสารโลหะหนัก (phytotoxicity) ในพืชลง (Evangelou et al., 2007) อาทิ การศึกษาของ Chen et al. (2004) พบว่า การเติมสารอิตาลีเอ มีส่วนช่วยเพิ่มความทนทานของพืชต่อโลหะหนัก และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมสารโลหะหนักในพืชอีกด้วย

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างสารคีเลต 2 ชนิดคือ สารอิตาลีเอ และสารเอ็นทีเอ ต่อประสิทธิภาพการดูดตั้งแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์ ซึ่งพบว่า การเติมสารคีเลตคืออิตาลีเอเพียงอย่างเดียวสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ดีกว่าการเติมสารเอ็นทีเอเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ในการเติมสารคีเลตยังช่วยเพิ่มปริมาณการสะสมโลหะหนักในส่วนต่างๆ ของพืชเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติของสารคีเลต โดยเฉพาะสารอิตาลีเอที่มีการระบุว่า เป็นสารที่มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการละลายสารแคดเมียมในดินได้ถึง 36 เท่าของดินปกติ (Van Engelen et al., 2007) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาที่พบว่า สารอิตาลีเอนอกจากจะมีบทบาทในการเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมแคดเมียมแล้ว

สารอดีทีที่เอยังมีบทบาทสำคัญในการช่วยลดความเป็นพิษของแคดเมียมลง และทำให้อัตราการเจริญเติบโตสัมพันธ์ของหญ้าเนเปียร์มีค่าสูงกว่าในชุดที่ไม่มีการเติมสารอดีทีที่เอด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Lawal and Ologundudu (2013), Tananonchai and Sampanpanish (2018) และ Wu et al. (2004) ที่ระบุว่า การเติมสารอดีทีที่เอส่งผลดีต่อการดูดซับแคดเมียมของพืชทดลอง และช่วยลดความเป็นพิษของแคดเมียมด้วย ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวเป็นไปในแนวทางเดียวกับโลหะชนิดอื่น เช่น ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง ที่พบว่า การเติมสารอดีทีที่เอช่วยเพิ่มปริมาณการสะสมตะกั่ว สังกะสี ทองแดง ในพืช และส่งผลให้พืชแสดงความเป็นพิษลดลง (Hernandez-Allica et al., 2007; Muhammad et al., 2009)

2.6 การศึกษาการกระจายตัวของแคดเมียมในพืช

ปัจจุบันการศึกษาการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมนั้น นิยมทำการศึกษาทั้งในรูปแบบของข้อมูลเชิงคุณภาพ และข้อมูลเชิงปริมาณ แต่พบว่า การศึกษาข้อมูลในเชิงปริมาณไม่สามารถอธิบายลักษณะการสะสม และการกระจายตัวของแคดเมียมในเนื้อเยื่อและเซลล์พืชได้อย่างชัดเจน ซึ่งการศึกษาการสะสม และการกระจายตัวของโลหะหนักในพืชในปัจจุบัน มีการศึกษาด้วยเครื่องมือวิเคราะห์เพียงไม่กี่ชนิด อาทิ การใช้แสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (synchrotron radiation micro-x-ray fluorescence spectroscopy; SR-micro-XRF) การใช้เลเซอร์อะเบลชันอินดักทีฟพลาสมาสเปกโตรเมทรี ที่สามารถแสดงลักษณะการกระจายตัวของแคดเมียมในพืชได้

2.6.1 แสงซินโครตรอน

แสงซินโครตรอน (synchrotron light) คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับแสงที่มาจากดวงอาทิตย์ แต่แสงซินโครตรอนนั้นคือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคที่มีประจุ เช่น อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเกือบเท่าความเร็วแสง และถูกบังคับให้เลี้ยวโค้งด้วยสนามแม่เหล็กทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานบางส่วน และถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่า “แสงซินโครตรอน” (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2555)

2.6.2 การทำงานของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน จะเริ่มทำการผลิตอิเล็กตรอน โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้กับไส้โลหะของปืนอิเล็กตรอนจนร้อน จนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา จากนั้นจึงใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงช่วยวกในการดึงอิเล็กตรอนให้วิ่งไปในทิศทางเดียวกัน ดังรูปที่ 2.12(ก) จากนั้นทำการเร่งความเร็วอิเล็กตรอนในแนวเส้นตรงด้วยเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง หรือ linac ดังรูปที่ 2.12(ข) เพื่อเร่ง

อิเล็กตรอนมีความเร็วสูงในระดับที่ต้องการ (40 ล้านอิเล็กตรอนโวลท์) จากนั้นป้อนอิเล็กตรอนนี้เข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลมหรือเครื่องซินโครตรอน ดังรูปที่ 2.12(ค) ทั้งนี้อิเล็กตรอนภายในเครื่องซินโครตรอนจะถูกบังคับให้วิ่งเป็นวงกลมและ มีความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งมีความเร็วสูงเกือบเท่าความเร็วแสง (1,000 ล้านอิเล็กตรอนโวลท์ หรือ 1 GeV) หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะส่งเข้าสู่วงกักเก็บอิเล็กตรอนเป็นขั้นตอนสุดท้าย โดยวงกักเก็บอิเล็กตรอนทำหน้าที่เพิ่มพลังงานเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงถึง 1,200 ล้านอิเล็กตรอนโวลท์ (1.2 GeV) เพื่อการผลิตแสงซินโครตรอนด้วยการใช้สนามแม่เหล็กบีบบังคับให้อิเล็กตรอนเลี้ยวเบน และปลดปล่อยแสงซินโครตรอนหรือโฟตอนออกมา ขณะเลี้ยวเบน และกักเก็บอิเล็กตรอนที่ผลิตขึ้นดังรูปที่ 2.12(ง) ซึ่งแสงซินโครตรอนจะถูกนำมาใช้ผ่านระบบลำแสงแสง โดยระบบลำแสงแสงจะมีการเลือกใช้แสงซินโครตรอนในย่านที่ต้องการศึกษาที่ผลิตได้จากวงกักเก็บอิเล็กตรอนมายังสถานีทดลอง ดังรูปที่ 2.12(จ) โดยสถานีทดลองประกอบด้วยท่อสุญญากาศ (vacuum) กระจกรวมแสง (collimating mirror) ระบบคัดเลือกพลังงานแสง (monochromator) กระจกโฟกัสแสง (focusing mirror) ระบบช่องสำหรับแสงส่องผ่าน (slit) และอุปกรณ์ปลีกย่อยอื่นๆ ส่วนท้ายสุดของระบบลำแสงแสงจะเป็นสถานีทดลอง ซึ่งมีระบบวัดสัญญาณติดตั้งอยู่เพื่อดำเนินงานด้วยเทคนิคการทดลองเฉพาะด้าน เพื่อตรวจวัดการกระเจิง (scattering) การดูดกลืน (absorption) การปลดปล่อย (emission) หรือการเรืองรังสี (fluorescence) แล้วผ่านตัวตรวจวัดสัญญาณ (detector) ซึ่งข้อมูลต่างๆ จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ และประมวลผลโดยนักวิทยาศาสตร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างของสสารในระดับโมเลกุลหรือโครงสร้างอะตอม

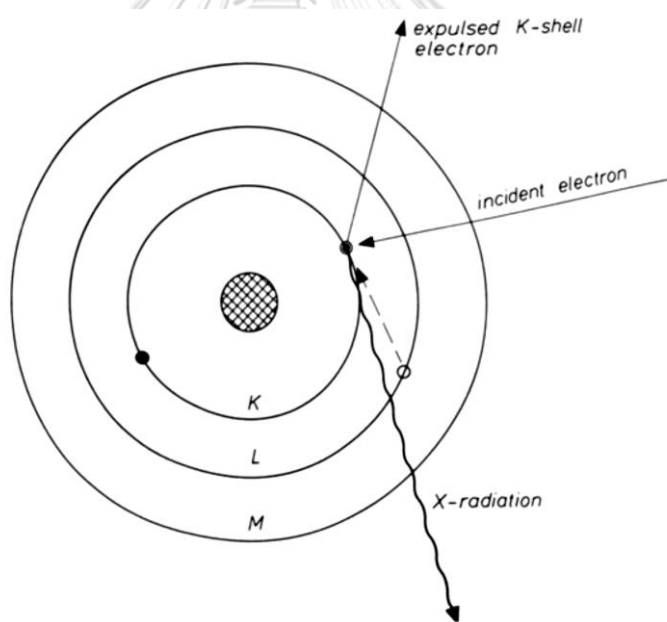


รูปที่ 2.12 เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2555)

2.6.3 การใช้แสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์

เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ หรือเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence, XRF) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้เพื่อศึกษาองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในตัวอย่าง โดยอาศัยความแตกต่างของชั้นพลังงานของธาตุแต่ละชนิด เมื่อทำการกระตุ้นอะตอมด้วยการให้พลังงานที่มากกว่าพลังงานที่ยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นใน ทำให้เกิดที่ว่าง และเมื่ออิเล็กตรอนในชั้นนอกกลายมาแทนที่ อะตอมจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า "การเรืองรังสีเอกซ์" (Theisen, 1965) ดังรูปที่ 2.13 ปรากฏการณ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างได้ ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์มีข้อดีหลายประการคือ การเตรียมตัวอย่างที่ไม่ยุ่งยาก และเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive method) โดยใช้แสงซินโครตรอนเป็นแสงที่มีความเข้มสูง ทำให้สามารถกำหนดลำรังสีเอกซ์ให้มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรได้ จึงจัดได้ว่าเทคนิคดังกล่าวมีความเหมาะสมในการหาองค์ประกอบของธาตุ และการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ในตัวอย่างอีกด้วย



รูปที่ 2.13 กลไกการเกิดการเรืองของรังสีเอกซ์
ที่มา: Theisen (1965)

เทคนิคเครื่องเร่งอนุภาคแสงซินโครตรอน เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ และมีประโยชน์มาก เนื่องจากเทคนิคเครื่องเร่งอนุภาคแสงซินโครตรอน เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในด้านวิทยาศาสตร์ วัสดุศาสตร์ ชีวการแพทย์ และสิ่งแวดล้อม โดยอาศัยซินโครตรอน ด้วยเทคนิคของการดูดกลืนรังสีเอกซ์ และเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ ทั้งในรูปแบบของการทำแผนภาพสองมิติและสามมิติ (Theisen, 1965; Willick et al., 2015) สำหรับเทคนิคเครื่องเร่งอนุภาคแสงซินโครตรอน ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ใน

งานวิจัยด้านสิ่งแวดล้อมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะการศึกษาการปนเปื้อนในตัวกลางทางสิ่งแวดล้อม (Anjum et al., 2013) รวมถึงการสะสม และการกระจายตัวของสารมลพิษในพืช เป็นต้น นอกจากนี้ การใช้ศึกษาแสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ ยังเป็นการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่ต้องการศึกษาในตัวอย่างวิเคราะห์ ที่ต้องมีการเลือกใช้พลังงานที่เหมาะสมของโฟตอนเอกซเรย์ เพื่อการตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของธาตุ (Zhao et al., 2014) และสารมลพิษตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ซึ่งนับว่ามีความสำคัญต่อการศึกษา และการวางแผนงานในการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีหลายผลงานวิจัยที่พบว่าเทคนิคดังกล่าวให้ผลดีในการศึกษาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในเนื้อเยื่อพืช (Anjum et al., 2013) โดยเฉพาะการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแคดเมียมไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืชด้วยแสงซินโครตรอน ซึ่งสามารถใช้ศึกษาการกระจายตัว การส่งผ่าน และการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของพืชได้ดี

หลักการทำงานในการวิเคราะห์โดยใช้แสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ เป็นการอาศัยการกระเจิงรังสีเอกซ์ ตามหลักการของ Bragg เมื่อรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยวตกกระทบผลึกหรือโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมอย่างมีระเบียบ จะเกิดการสะท้อนบนระนาบของผลึก และเมื่อผลต่างของระยะทางเดินของรังสีเอกซ์มีค่าเท่ากับจำนวนเท่า (n) ของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (λ) จะทำให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนของห้วงวัด ซึ่งรูปแบบดังกล่าวเรียกว่า diffraction pattern ดังนั้นเมื่อทราบความยาวคลื่น และวัดมุมที่เกิดการเลี้ยวเบน (q) ก็สามารถคำนวณหาค่าระยะระหว่างระนาบของผลึกได้ (d) โดยปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนชั้นในของอะตอมถูกกระตุ้นให้หลุดออกมา และเกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนในชั้นถัดมา ทำให้เกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ โดยรังสีเอกซ์ที่คายออกมานั้นจะมีคุณลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละธาตุ ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการหาองค์ประกอบทางอะตอมของสารตัวอย่างได้ (Lombi et al., 2011).

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ กับการศึกษาการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยพืช เช่น การศึกษาของ Woranan และคณะ (2010) ที่ศึกษาความทนทานของต้นว่านมหากาฬต่อการสะสมสังกะสี และแคดเมียมที่ปลูกในระบบเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ โดยการเติมแคดเมียม และสังกะสีในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอน ซึ่งเป็นการศึกษาการกระจายตัวของสังกะสีและแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของพืชด้วยการใช้แสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ ผลการศึกษา พบว่า ต้นว่านมหากาฬมีการส่งผ่านสังกะสี และแคดเมียมจากส่วนรากไปสู่ส่วนหัว และส่งผ่านตามท่อลำเลียงไปสะสมยังลำต้น และใบ โดยพบว่า แคดเมียม และสังกะสีมีการสะสมมากบริเวณชั้นคอร์เทกซ์ (cortex) และสะสมน้อยในเนื้อเยื่อบริเวณแกนกลางลำต้น ส่วนการสะสมแคดเมียมได้มีการนำเข้าไปสะสมยังส่วนเนื้อของหัวว่านมหากาฬ และเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นพาราเรโนไคมา (parenchyma) ของใบ ทั้งนี้การศึกษาดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Fukuda et al. (2008) ทำการศึกษาการ

กระจายตัวของแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของพืช *Arabidopsis halleri* (L.) จากการศึกษาดังกล่าว พบการสะสมแคดเมียมบริเวณขนใบ และเนื้อเยื่อชั้นนอกของพืชได้อย่างเด่นชัดกว่าบริเวณอื่น สอดคล้องกับการศึกษาของ Arai et al. (2004) ที่ศึกษาการกระจายตัวของแคดเมียม และสังกะสี โดยใช้รังสีเอกซเรย์พลังงานสูง โดยใช้เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์พบว่า การกระจายตัวของแคดเมียมมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับสังกะสี และพบว่า มีการกระจายตัวที่บริเวณแกนของใบ และขนใบสูงกว่าบริเวณอื่นอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากการศึกษารายการกระจายตัวของแคดเมียมในพืชแล้ว ยังพบว่า มีการศึกษารายการกระจายตัวของโลหะหนักหลายชนิด เช่น สารหนู แคลเซียม โครเมียม เหล็ก แมงกานีส สังกะสี นิกเกิล และทองแดง ในพืชหลายชนิด เช่น ในรากของต้น Cowpea โดยพบว่า สังกะสี นิกเกิล และทองแดง จะจับกับกรดเพคติก (pectic acid; polygalacturonic acid; $(C_6H_8O_6)_n$) บริเวณ rhizodermis และ cortex ในปริมาณที่สูงกว่าบริเวณอื่น (Kopittke et al., 2013) ส่วนในราก ของต้น *Spartina alterniflora* มีการสะสมสารหนู แคลเซียม โครเมียม เหล็ก แมงกานีส สังกะสี นิกเกิล และทองแดง บริเวณเปลือกด้านนอกของรากได้สูงกว่าเนื้อเยื่อชั้นนอกของรากอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบเนื้อเยื่อชั้นนอกและเนื้อเยื่อชั้นในของพืช พบว่า เนื้อเยื่อชั้นนอกมีปริมาณการสะสมและการกระจายตัวของสารหนู แคลเซียม โครเมียม เหล็ก แมงกานีส สังกะสี นิกเกิล และทองแดง สูงกว่าบริเวณเนื้อเยื่อชั้นในเช่นกัน (Feng et al., 2017) นอกจากนี้ยังมีการศึกษารายการกระจายตัวของสังกะสี และเหล็กในเมล็ดข้าวสาลี จากการศึกษาพบว่า แคดเมียมมีการกระจายตัวสูงบริเวณ vascular bundle รองลงมา คือ บริเวณ endosperm ของเมล็ดข้าวสาลี นอกจากนี้ยังมีการศึกษาโครงสร้างของธาตุ และการกระจายของธาตุต่างๆ บริเวณลำต้นพืช อาทิ โพแทสเซียม แคลเซียม แมงกานีส เหล็ก และสังกะสี ในลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) ซึ่งพบการกระจายตัวอย่างเด่นชัดบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอกของลำต้นพืช (Kirker et al., 2017)

2.6.4 การใช้เลเซอร์อะบเลชันอินดักทีฟลิคอบเพิลพลาสมาอาร์แมสสเปกโทรเมทรี

การใช้เลเซอร์อะบเลชันอินดักทีฟลิคอบเพิลพลาสมาอาร์แมสสเปกโทรเมทรี เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ (elemental analysis) โดยอาศัยหลักการของอะตอมมิกสเปกโทรสโกปี (atomic spectroscopy) โดยอาศัยหลักการดูดกลืนพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในอะตอม และเปลี่ยนระดับพลังงานไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นกว่าเดิมในระยะเวลาสั้นๆ ซึ่งพลังงานที่ให้กับอะตอมจะใช้พลังงานแสงที่มีความจำเพาะกับธาตุแต่ละชนิด ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าของการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของโลหะ เมื่อโลหะมีความเข้มข้นมากจะดูดกลืนพลังงานแสงได้มาก และในทางตรงข้ามหากโลหะมีปริมาณน้อยก็จะดูดกลืนพลังงานแสงได้น้อย ซึ่งเป้นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบอร์ต (beer-lambert law)

ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ จึงเป็นการใช้แสงเลเซอร์ยิงไปที่ตัวอย่างให้เกิดการระเหิด (laser ablation) แล้วโมเลกุลดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องอินดักทีฟลิคอบเพิลพลาสมา

(inductively coupled plasma; ICP) โดยพลังงานจากพลาสมา จะทำให้เล็กตรอนวงนอกของอะตอมหลุดออก และเกิดเป็นไอออนบวก จากนั้นไอออนบวกจะถูกแยกและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแมสสเปกโตรสโกปี (mass spectroscopy) ซึ่งปริมาณไอออนบวกที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของสารตัวอย่าง สำหรับการศึกษาระยะสมและการกระจายตัวของสารแคดเมียมในเซลล์พืช อาทิ *Sedum alfredii* โดยใช้เทคนิคเลเซอร์อะบเลชันอินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโตรเมตรี ผลการศึกษา พบว่า ในส่วนของลำต้นมีการสะสมของแคดเมียมในปริมาณที่สูงใน pith และ cortex และในส่วนของใบ พบการสะสม และการกระจายตัวของแคดเมียมใน mesophyll และ vascular cells ในปริมาณที่สูงกว่าบริเวณใกล้เคียง นอกจากนี้ยังพบว่า การสะสมและการกระจายตัวของแคดเมียมมีความคล้ายคลึงกับแคลเซียม (Tian et al., 2011)

2.7 การศึกษารูปของแคดเมียมที่สะสมในพืช

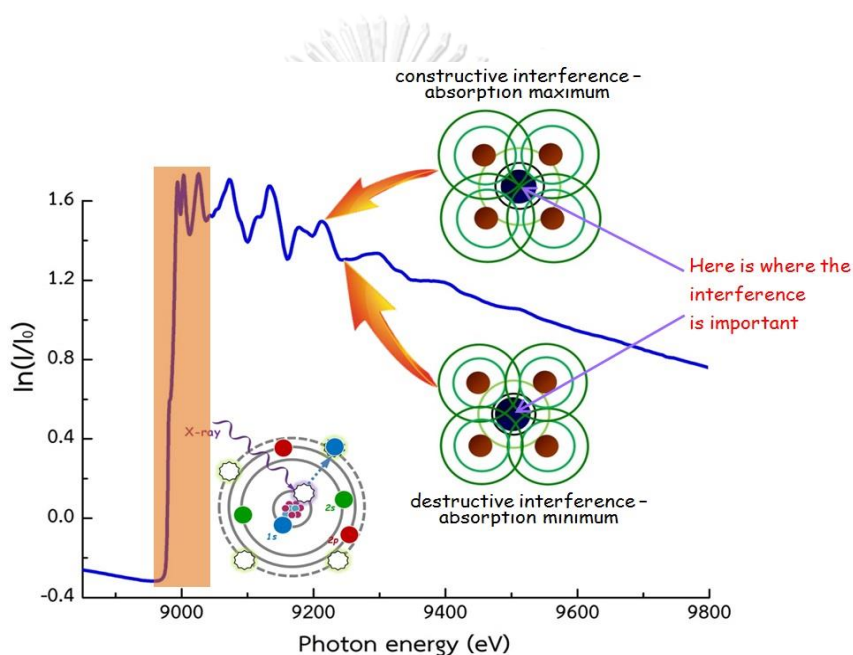
2.7.1 การใช้แสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคเอกซเรย์แอบซอร์บชันสเปกโตรสโกปี

ปัจจุบันการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาเทคนิคการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนไม่เพียงศึกษาในเชิงปริมาณของการสะสมโลหะหนักเท่านั้น แต่ยังมีการศึกษาถึงรูปของแคดเมียมที่พบในพืชอีกด้วย เนื่องจากการศึกษาจำนวนมากมีการระบุว่า การที่พืชสะสมแคดเมียมเข้าสู่ลำต้นพืชแล้วจะทำให้โลหะหนักเหล่านั้นลดความเป็นพิษหรือเปลี่ยนรูปไป ซึ่งการใช้แสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคเอกซเรย์แอบซอร์บชันสเปกโตรสโกปี (synchrotron radiation x-ray absorption spectroscopy; SR-XAS) เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการที่ธาตุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดูดกลืนรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงใช้ค่าพลังงาน absorption edge ของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์เป็นตัวกำหนดมุมตกกระทบระหว่างแสงซินโครตรอน และผลึกในการคัดแยกรังสีเอกซ์ นอกจากนี้การศึกษาดังกล่าวยังสามารถระบุสถานะออกซิเดชัน (oxidation state) ของธาตุในสารประกอบ สามารถจำแนกชนิดของสารที่มีองค์ประกอบธาตุชนิดเดียวกัน รวมถึงสามารถศึกษาลักษณะพันธะเคมี สมมาตร โคออดิเนชัน โครงสร้างอะตอม (เฉพาะบริเวณได้อย่างละเอียด) พันธะ และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนต่างๆ ในพืชได้ (Koren et al., 2013; Lombi et al., 2011; Lombi et al., 2009) นอกจากนี้สามารถอนุมานรูปร่างของออร์บิทัลได้ (orbital) และสามารถอธิบายกลไกการสะสมสารโลหะหนักได้ชัดเจนยิ่งขึ้น (Isaure et al., 2006) สำหรับสัญญาณสเปกตรัมของการใช้แสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคเอกซเรย์แอบซอร์บชันสเปกโตรสโกปี ประกอบด้วย 2 โครงสร้างหลัก (ดังรูปที่ 2.14) คือ

1) ช่วง x-ray absorption near edge structure (XANES) ปรากฏในสเปกตรัมของสัญญาณ XAS ตั้งแต่บริเวณใกล้ขอบการดูดกลืนรังสีของอะตอมจนถึงบริเวณช่วงพลังงานโฟตอนประมาณ 50 eV เนื้อหาของการดูดกลืน โครงสร้าง XANES ที่เกิดขึ้นนั้น เกิดจากการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานระดับลึก (core electron) แล้วย้ายสถานะพลังงานไปยังสถานะที่ว่างอยู่ภายในอะตอม จากโครงสร้าง XANES สามารถนำมาวิเคราะห์ได้หลายอย่าง เช่น วิเคราะห์

สถานะออกซิเดชันของธาตุ รูปฟอร์มทางเคมีของอะตอม และสามารถแยกองค์ประกอบทางเคมีที่มีในสารตัวอย่างได้ เป็นต้น

2) ช่วง extended x-ray absorption fine structure (EXAFS) ปรากฏในสเปกตรัมของสัญญาณ XAS ตั้งแต่บริเวณต่อจากโครงสร้าง XANES เนื้อขอบการดูดกลืนรังสี ไปจนถึงบริเวณช่วงพลังงานโฟตอนประมาณ 500 eV ถึง 1,000 eV โครงสร้าง EXAFS เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยมาจากอะตอมในระหว่างการดูดกลืนรังสีเอกซ์ และประพติตัวเป็นคลื่นไปชนกับอะตอมรอบข้าง ทำให้เกิดการกระเจิง และสะท้อนกลับมาทำให้เกิดการแทรกสอด ดังนั้นจากโครงสร้าง EXAFS ทำให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างของอะตอม ความยาวพันธะ รูปแบบการจับตัวของโมเลกุลของสารที่สนใจ รวมถึงชนิด และจำนวนของอะตอมรอบข้างอะตอมที่สนใจ



รูปที่ 2.14 สัญญาณสเปกตรัมของการใช้แสงซินโครตรอน

ที่มา: <https://www.slri.or.th/th/beamline/bl8-xas.html?view=article&id=4590&catid=282>

2.7.2 การศึกษารูปฟอร์มของโลหะหนักในพืช

การประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคเอกซ์เลย์แอบซอร์บชันสเปกโตรสโกปี เป็นที่แพร่หลายในการศึกษารูปฟอร์มของโลหะหนักในพืช อาทิ ในการศึกษาความทนทานต้นว่านมหากาฬต่อการดูดซับ และสะสมสังกะสี และแคดเมียม ที่ปลูกในระบบเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ ที่มีการเติมสังกะสี และแคดเมียมในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ ของ Panitlertumpai et al. (2013) พบว่า ส่วนหัว (ลำต้นใต้ดิน) มีการสะสมสังกะสีในรูป Zn (II) ไอออนจับอยู่กับอะตอมออกซิเจน (Zn-O) และมีการสะสมแคดเมียมในส่วนเนื้อของหัวว่านมหากาฬ ซึ่งโดยมากอยู่ในรูปของ Cd (II) ไอออน ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Fukuda et al. (2008) ที่ทำการศึกษารูปฟอร์มของแคดเมียมใน *Arabidopsis halleri* พบว่า แคดเมียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแคดเมียมไดวาเลนต์ (divalent

cadmium, Cd(II)) นอกจากนั้นยังพบว่า แคดเมียมจะเกิดพันธะอยู่กับอะตอมออกซิเจน (Cd-O) และ/หรืออะตอมของไนโตรเจน (Cd-N) นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาของ Tian et al. (2011) ที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรูปฟอร์มของแคดเมียมกับสารอินทรีย์ในพืช *Sedum alfredii* โดยการใช้แสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคเอกซเรย์แอมป์ซอร์บชันสเปกโตรสโกปี ผลการศึกษา พบว่า รูปฟอร์มของแคดเมียมมีการจับตัวกับกรดมาลิกซ์ (malic acid, C₄H₆O₅) เมื่อนำไปศึกษาการกระจายตัวพบว่า แคดเมียมมีการกระจายตัวบริเวณเหนือหรือตาสูงกว่าบริเวณข้างเคียง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณกรดมาลิกซ์ในพืชที่มักพบในเนื้อเยื่อเจริญได้สูงกว่าบริเวณอื่นด้วย

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาของ Isaure et al. (2006) ที่ทำการศึกษารูปทางเคมีของแคดเมียมในตัวอย่างพืช โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนร่วมกับเทคนิคเอกซเรย์แอมป์ซอร์บชันสเปกโตรสโกปี พบว่า การกระจายตัวของแคดเมียมอยู่บริเวณขอบใบในปริมาณสูงกว่าบริเวณอื่นอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อศึกษาวิเคราะห์รูปทางเคมีแล้วพบว่า แคดเมียมจะเกิดพันธะอยู่กับอะตอมออกซิเจน (Cd-O) และอะตอมของไนโตรเจน (Cd-N) เป็นส่วนใหญ่ และยังพบแคดเมียมบางส่วนเกิดพันธะอยู่กับอะตอมซัลเฟอร์ (Cd-S) ซึ่งสอดคล้องกับ Akhter et al. (2014) ที่มีการศึกษารูปทางเคมีของแคดเมียมบริเวณรากของข้าวบาเลย์ และรากต้นหอม พบว่า รูปทางเคมีของแคดเมียม บริเวณรากของพืชทั้งสองชนิดจะเกิดพันธะอยู่กับอะตอมออกซิเจน (Cd-O) อะตอมของไนโตรเจน (Cd-N) และอะตอมซัลเฟอร์ (Cd-S) เช่นกัน

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้พืชในการดูดซับและสะสมแคดเมียม

Yang et al. (2017) ได้ทำการศึกษากการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียมโดยใช้ต้นยาสูบ (tobacco) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของต้นยาสูบต่อการดูดซับและสะสมแคดเมียม โดยเปรียบเทียบจากดินสองชนิดที่มีสถานะเป็นกรด หรือดินเปรี้ยว (acidic soils) ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการสะสมและดูดซับแคดเมียมในต้นยาสูบ คิดเป็น 6.24 เปอร์เซ็นต์-9.43 เปอร์เซ็นต์

Kersten et al. (2016) ได้ทำการศึกษากการบำบัดแคดเมียมและตะกั่วปนเปื้อนในแหล่งต้นน้ำบนเทือกเขาร็อกกี ด้วยต้น *Salix drummondiana* ต้น *Salix monticola* และต้น *Salix planifolia* โดยศึกษาประสิทธิภาพการสะสมแคดเมียมและตะกั่ว รวมถึงความทนทานต่อการสะสมแคดเมียม และตะกั่วด้วย จากการศึกษาพบว่า ต้น *Salix monticola* มีความทนทานต่อตะกั่วที่ระดับความเข้มข้นสูง และเจริญเติบโตได้ดี จึงจัดได้ว่าเหมาะสมในการนำมาใช้กำจัดตะกั่ว โดยที่ต้น *Salix drummondiana* และต้น *Salix planifolia* มีการสะสมแคดเมียมได้ในปริมาณสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ต้น *Salix drummondiana* ที่มีการสะสมแคดเมียมในลำต้นสูงกว่า ต้น *Salix monticola* และต้น *Salix planifolia* ถึง 2.5 เท่า

Kathal et al. (2016) ได้ทำการศึกษากการบำบัดแคดเมียมในดินปนเปื้อนจากหลายพื้นที่ด้วยต้นผักกาดเขียว (*Brassica juncea*) โดยทำการปลูกในกระถางทดลอง ผลการศึกษาพบว่า ผักกาด

เขียวที่ปลูกมีอัตราการเจริญเติบโตสูง ทนทานต่อการปลูกในดินปนเปื้อน และสามารถดูดดึง และสะสมแคดเมียมได้ปริมาณสูง จึงสามารถจัดได้ว่า ผักกาดเขียวเป็นพืชที่ศักยภาพในการสะสมแคดเมียมได้ดี ทั้งนี้จากการศึกษาดังกล่าวมีการกล่าวถึงปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดว่า ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ อุณหภูมิ ชนิดของดิน และระยะเวลาในการบำบัดอีกด้วย

Chitra et al. (2011) ได้ทำการศึกษากการบำบัดแคดเมียมในดินปนเปื้อน โดยใช้ยาสูบ (*Nicotiana tabacum* L.) ข้าวโพด (*Zea mays* L.) และข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) ในดินปนเปื้อนแคดเมียมที่มีระดับความเข้มข้น 10, 30 และ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และศึกษาการเจริญเติบโตของหน่อ และรากของพืชศึกษาด้วย ผลการศึกษาพบว่า การดูดดึงและการสะสมแคดเมียมของพืชที่ปลูกทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณสูงขึ้น (ยกเว้นยาสูบ) นอกจากนี้ยังพบว่า มีการเจริญเติบโตของหน่อลดลง และมีชีวมวลลดลงด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ระดับของแคดเมียมมีผลกระทบต่อข้าวโพด ข้าวสาลี และยาสูบ

2.8.2 งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้หญ้าเนเปียร์ในการบำบัดสารโลหะหนัก

Hu et al. (2018) ได้ทำการศึกษาศักยภาพการบำบัดแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์ยักษ์ (*Pennisetum sinense* Roxb.) และกิจกรรมของแบคทีเรียบริเวณราก โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดในดินทางการเกษตรที่ปนเปื้อน เพื่อนำไปใช้เป็นพืชพลังงาน โดยทำการศึกษาผลของแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 2, 4, และ 8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ผลการศึกษา พบว่าแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินส่งผลต่อกิจกรรม และความหลากหลายแบคทีเรียบริเวณรากของพืชทดลอง นอกจากนี้เมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นส่งผลให้การสะสมแคดเมียมในพืชทดลองเพิ่มขึ้นด้วย โดยพบการสะสมแคดเมียมสูงสุดในชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยมีการสะสมในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดิน เท่ากับ 28.87 และ 34.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ

Wiangkham and Prapagdee (2018) ได้ทำการศึกษาศักยภาพของการใช้แบคทีเรียในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยหญ้าเนเปียร์ โดยทำการทดลองเป็นเวลา 6 เดือน ผลการศึกษาพบว่า *Micrococcus* SP มีส่วนช่วยเพิ่มชีวมวลในส่วนเหนือดิน (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่เดียวกัน *Micrococcus* SP และ *Arthrobacter* SP มีส่วนช่วยเพิ่มการสะสมแคดเมียมบริเวณราก โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดดึงและปัจจัยการสะสมทางชีวภาพของแคดเมียมในพืชชุดการทดลองที่มีการเติมเชื้อแบคทีเรียสูงกว่าชุดควบคุม และหญ้าเนเปียร์อาจถือได้ว่าเป็นพืชกลุ่ม phytostabilization และเมื่อนำหญ้าเนเปียร์ไปเผา พบว่า ให้ค่าความร้อนสูง โดยแคดเมียมยังคงเก็บรักษาไว้ในเถ้า และบางส่วนถูกปล่อยออกมาในอากาศ

Ishii et al. (2015) ได้ทำการศึกษาศักยภาพการบำบัดแคดเมียมโดยหญ้าเนเปียร์กรณีศึกษาเมืองคิซุ ประเทศญี่ปุ่น พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบผลของการเก็บเกี่ยว พบว่า การเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 ทำให้ประสิทธิภาพการดูดดึง

แคดเมียมของหญ้าเนเปียร์สูงกว่าการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณแคดเมียมในดิน หลังการเก็บเกี่ยวครั้งที่ 2 ลดลง 4.6 เปอร์เซ็นต์

Ishii et al. (2013) ได้ทำการศึกษาการปลูกหญ้าเนเปียร์ 2 สายพันธุ์ (Wruk wona และ Merkeron) เพื่อบำบัดแคดเมียม บริเวณพื้นที่ทำฟาร์มปศุสัตว์ เมืองคิวกู ประเทศญี่ปุ่น โดยผลการศึกษาพบว่า หญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ Wruk wona เจริญเติบโตได้ดี และมีการสะสมแคดเมียมได้สูงกว่าหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ Merkeron โดยพบว่า ใน 1 ฤดูกาลหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ Wruk wona สามารถช่วยลดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินได้ถึง 14 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้จากการศึกษาดังกล่าวระบุว่า หญ้าเนเปียร์ทั้ง 2 สายพันธุ์ มีความเหมาะสมในการปลูก และสามารถเจริญเติบโตได้ในพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียม

2.8.3 งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนในการบำบัดสารโลหะหนัก

Nanthavong and Sampanpanish (2015) ได้ทำการศึกษาผลของเอทอีเอ และอีทีอีเอ ต่อการดูดซับสารหนูที่ปนเปื้อนในดินด้วยไมยราบ โดยมีการใช้แสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ มาศึกษารูปแบบการแพร่กระจายของสารหนูในส่วนต่างๆ ของต้นไมยราบ ผลการวิเคราะห์พบว่า ไม่สามารถตรวจพบรูปแบบการแพร่กระจายของสารหนูในส่วนต่างๆ ของต้นไมยราบ ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 29.71 มิลลิกรัมสารหนูต่อกิโลกรัมพืชได้ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ และระดับความเข้มข้นของสารหนูในตัวอย่างที่ต่ำเกินไป

Smith et al. (2009) ได้ทำการศึกษาดำเนินการกระจายตัว และรูปแบบทางเคมีของสารหนูในเนื้อเยื่อของต้นข้าว โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยการใช้แสงซินโครตรอน ด้วยใช้เทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของสารหนูในส่วนราก ต้นข้าว ใบข้าว และเมล็ดข้าว โดยใช้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์ของวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาด 7 GeV ผลการศึกษา พบว่า สารหนูภายในเนื้อเยื่อรากมีความเข้มข้นสูงสุด โดยพบการกระจายของสารหนูที่พื้นผิวราก นอกจากนี้ยังพบการกระจายตัวของสารหนูในต้นข้าว และเนื้อเยื่อใบรองลงมาจากราก และในส่วนของเมล็ดข้าวมีการกระจายของสารหนูน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่า กลไกการสะสมสารหนูนั้นได้มีการกระจายตัวมากที่สุดในส่วนของเนื้อเยื่อรากของต้นข้าว

Panitlertumpai et al. (2008) และ Panitlertumpai et al. (2013) ได้ทำการศึกษาการสะสม และความทนทานต่อสังกะสีและแคดเมียมด้วยต้นว่านมหากาฬที่ปลูกในระบบเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ โดยการเติมสังกะสีและแคดเมียมในปริมาณความเข้มข้นต่างๆ แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอน ซึ่งเป็นการศึกษาสถานะออกซิเดชันรูปแบบทางเคมีของสังกะสีและแคดเมียม รวมถึงการกระจายตัวของสังกะสีและแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของพืชด้วยเทคนิค extended x-ray absorption fine structure (EXAFS) และการใช้แสงซินโครตรอน โดยใช้เทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ ผลการศึกษา พบว่า ต้นว่านมหากาฬมีการส่งผ่านสังกะสีและแคดเมียมจากส่วนรากไปสู่ส่วนหัว และส่งผ่านตามท่อลำเลียงไปสะสมยังลำต้น และใบโดยพบว่า สังกะสี และแคดเมียมมี

การสะสมมากบริเวณชั้นคอร์เท็กซ์ (cortex) และสะสมน้อยในเนื้อเยื่อบริเวณแกนกลางลำต้น และเนื้อเยื่อลำเลียง สำหรับการวิเคราะห์ด้วย EXAFS Zn K-edge พบว่า ส่วนหัว (ลำต้นใต้ดิน) มีการสะสมสังกะสีในรูป Zn (II) ไอออนจับอยู่กับอะตอมออกซิเจน (Zn-O) ส่วนการสะสมแคดเมียมได้มีการนำเข้าไปสะสมยังส่วนเนื้อของหัวว่านมหากาฬ ซึ่งโดยมากจะอยู่ในรูปของ Cd (II) ไอออน อย่างไรก็ตามการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า ต้นว่านมหากาฬมีกลไกการสะสมสังกะสี และแคดเมียมไปเก็บไว้ในเซลล์ชั้นคอร์เท็กซ์ของลำต้น และเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นพาราเรโนไมมาร์ (parenchyma) ของใบได้อย่างชัดเจน



บทที่ 3 วิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ สำหรับโรงเรือนทดลอง

- 1) หญ้าเนเปียร์แคระ
- 2) โรงเรือนทดลอง ขนาด 4 x 6 X 3 เมตร
- 3) ขวดพลาสติกขนาด 1.5 ลิตร
- 4) กล่องพลาสติกทึบแสง ขนาด 0.4 x 0.8 X 0.5 เมตร
- 5) น้ำประปา
- 6) น้ำปราศจากไอออน
- 7) กระจกบอทดวง ขนาด 1 ลิตร
- 8) หัวทราย
- 9) ปุ่มเติมอากาศ
- 10) สายยาง
- 11) แผ่นโฟม

3.1.2 อุปกรณ์ เครื่องมือ สำหรับเก็บตัวอย่างพืชและน้ำ

- 1) ขวดพลาสติก ขนาด 200 มิลลิลิตร
- 2) มีดหรือกรรไกร
- 3) ถูงซีป ขนาด 0.1 เมตร X 0.14 เมตร
- 4) น้ำปราศจากไอออน
- 5) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
- 6) ตะกร้าพลาสติก
- 7) ปากกา

3.1.3 อุปกรณ์ เครื่องมือ สำหรับการทดลอง

- 1) เครื่องแก้ว
 - กรวยกรอง
 - ปีกเกอร์
 - ปีเปต
 - กระจกบอทดวง

- ขวดปริมาตร
 - ขวดรูปชมพู่
 - กระจกนาฬิกา
- 2) กระดาษกรองเบอร์ 40 Whatman ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร
 - 3) พาราฟิล์ม
 - 4) ขวดพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร
 - 5) หลอดพลาสติกสำหรับการปั่นเหวี่ยง
 - 6) เตอบ ยี่ห้อ Memert รุ่น SM 400
 - 7) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Denver Instrument รุ่น TP-1502
 - 8) ตู้ดูดควัน (Fume Hood) ยี่ห้อ Biobase รุ่น FH1000(X)
 - 9) เครื่องทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze Dryer) ยี่ห้อ Buchi รุ่น Lyovapor™ L-200
 - 10) เครื่อง Heating box ยี่ห้อ IKA รุ่น 4025400
 - 11) เครื่อง pH meter ยี่ห้อ WTW รุ่น pH 3210 set 4
 - 12) เครื่อง Electro-conductivity meter ยี่ห้อ WTW รุ่น cond 3210 set 2
 - 13) เครื่อง Oxidation-reduction potential meter ยี่ห้อ WTW รุ่น pH 3210 set 4
 - 14) เครื่อง Atomic absorption spectrometer ยี่ห้อ Perkin elmer รุ่น AAnalyst™ 800
 - 15) ลำแสงซินโครตรอน เทคนิค Micro x-ray fluorescence spectrometry (XRF)

Monochromator	:	Crystal monochromator (horizontally diffractive double crystal monochromator)
Energy range	:	4-15 keV
Resolution	:	Si(111); 1.5×10^{-4}
 - 16) ลำแสงซินโครตรอน เทคนิค X-ray absorption near edge structure (XANES)

Energy range	:	4.5 – 34 keV
Flux (microfocused)	:	5×10^{11} (2×10^{10}) s ⁻¹ at 10 keV
Beam size (microfocused):	:	60 (H) × 200 (V) (5×5) μm^2
Resolving power	:	7000
High harmonic ratio	:	< 10^{-4}
 - 17) เครื่องเลเซอร์อะบเลชันอินดักทีฟลึคอบเพิลพลาสมาอาร์แมสสเปกโตรเมทรี (LA-ICP-MS)

Laser ablation	ยี่ห้อ	ESI รุ่น NWR-213
Spectrometer	ยี่ห้อ	ThermoScientific รุ่น iCapQ
 - 18) เครื่องไมโครเวฟไดเจสชัน ยี่ห้อ Millstone รุ่น Ultrawave single reaction chamber microwave digestion system
 - 19) ตู้แช่แข็งอุณหภูมิต่ำ -60°C ยี่ห้อ The Freezer advance รุ่น WCC-2110

3.1.4 สารเคมี

- 1) แคดเมียมไนเตรต ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$)
- 2) เอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_8$)
- 3) กรดไนตริกเข้มข้น (65 เปอร์เซ็นต์ HNO_3)
- 4) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30 เปอร์เซ็นต์ H_2O_2)

3.2 สถานที่วิจัย

การดำเนินการทดลองทั้งหมดได้ดำเนินการในโรงเรียนทดลอง บริเวณตาดฟ้า ชั้น 2 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ดังภาคผนวก ก1) และในส่วนของ การวิเคราะห์ตัวอย่างทดลองทั้งหมดได้ดำเนินการในห้องปฏิบัติการ ชั้น 3 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ดังภาคผนวก ก2) และตัวอย่างทดลอง บางส่วนนำไปวิเคราะห์ ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จัหวัดนครราชสีมา (ดัง ภาคผนวก ก3) และ national synchrotron radiation research center (NSRRC) ประเทศ ใต้หวัน (ดังภาคผนวก ก4)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมการทดลอง

- 1) การเตรียมภาชนะทดลอง: ในการทดลองใช้ขวดพลาสติกขนาด 1.5 ลิตร แช่ด้วยกรดไนตริก ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 1 คืน จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง
- 2) การเตรียมพืชทดลอง: นำท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระที่ใช้ในการทดลองมาจากพื้นที่ที่ไม่มี การปนเปื้อน จากนั้นนำมาปลูกและสุ่มเก็บตัวอย่างมาเพื่อวิเคราะห์เพื่อยืนยันว่าพืชที่ใช้ในการศึกษา ไม่มีการปนเปื้อนของแคดเมียม ตามวิธีของ united states environmental protection agency (USEPA) method 3052 (USEPA., 1996)
- 3) การเตรียมสารเคมี และสารละลาย: สารเคมีที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดเป็นเกรดสำหรับการ วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ดังรายการต่อไปนี้;
 - แคดเมียมไนเตรต ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$)
 - เอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_8$)

3.3.2 การศึกษาเบื้องต้น (ดังภาคผนวก ก5)

1) การเตรียมภาชนะทดลอง: การทดลองนี้ใช้ภาชนะหรือกระถางพลาสติกขนาด 1.5 ลิตร จำนวน 135 กระถาง

2) การเตรียมพืชทดลอง: การทดลองนี้ใช้หญ้าเนเปียร์แคะจากพื้นที่ที่ไม่มีการปนเปื้อน โดยนำท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคะ มาจากศูนย์วิจัยพืชอาหารสัตว์ จังหวัดนครราชสีมา มาปักชำเป็นเวลา 30-45 วัน

3) การเตรียมสารละลาย: การทดลองในครั้งนี้ใช้สารละลายแคดเมียมไนเตรดที่ 6 ระดับความเข้มข้น คือ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร สารละลายอีดีทีเอ ที่ 6 ระดับความเข้มข้น คือ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสารอีดีทีเอที่อัตราส่วนโมล 1:0.5, 1:1 และ 1:2

4) การปลูกและการดูแลรักษา: การทดลองในครั้งนี้ได้ทำการปลูกหญ้าเนเปียร์แคะในภาชนะ พลาสติกหรือกระถางขนาด 1.5 ลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ และมีการเติมอากาศร่วมด้วย ตลอดระยะเวลาของการทดลอง

5) การเก็บตัวอย่าง

- ตัวอย่างพืช ทำการเก็บตัวอย่างพืชทุกวันที่ 15, 30 และ 45 ของการทดลอง และทำการล้างตัวอย่างพืชด้วยน้ำประปา 2-3 ครั้งและทำการล้างอีกครั้งด้วยน้ำกลั่น หลังจากนั้นนำพืชมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 2-3 ชั่วโมง จากนั้นทำการแยกพืชเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนเหนือน้ำ (ต้นและใบ) และ ส่วนใต้น้ำ (ราก) ทำการชั่งน้ำหนักสด และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2-3 วัน และนำมาชั่งน้ำหนักแห้งอีกครั้ง ทั้งนี้ในแต่ละช่วงของการทดลองได้มีการสังเกตอาการความผิดปกติของพืชทดลองด้วย

- ตัวอย่างน้ำ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกวันที่ 15, 30 และ 45 ของการทดลอง ใส่ขวดขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวดทุกชุดการทดลอง โดยขวดที่ 1 สำหรับทำการวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน และขวดที่ 2 ทำการเติมกรดไนตริกเข้มข้น 2-3 หยดเพื่อรักษาตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด

6) การวิเคราะห์ตัวอย่าง

- การสังเกตการแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคะต่อสารละลายแคดเมียมและสารละลายแคดเมียม-อีดีทีเอ โดยได้ทำการสังเกตตามวิธีของ Brown et al. (1991) และ Boutin et al. (2012) โดยให้คะแนนความเป็นพิษดังตารางที่ 3.1 และคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษดังสมการที่ 3.1 นอกจากนั้นยังทำการวัดความสูง และชั่งน้ำหนักพืชทดลอง เพื่อนำมาบ่งชี้ปริมาณมวลชีวภาพ และคำนวณอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ตามวิธีของ Paine et al. (2015) ดังสมการที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 การประเมินด้วยสายตาต่อความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระภายหลังจากการได้รับแคดเมียมและสารละลายอีทีไอ

ระดับความเป็นพิษ (คะแนน)	ลักษณะการแสดงอาการของพืชทดลอง
0	พืชปกติไม่มีการเปลี่ยนสีของใบ
1	ความเป็นพิษต่อพืชเล็กน้อย แผ่นใบเริ่มมีสีเหลืองหรือเหลืองซีด
2	ความเป็นพิษต่อพืชเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แผ่นใบเหลืองหรือเหลืองซีด
3	ความเป็นพิษต่อพืชเพิ่มมากขึ้น แผ่นใบเหลืองหรือไหม้ 50 เปอร์เซ็นต์
4	ความเป็นพิษต่อพืชรุนแรง ใบเหลืองหรือไหม้เกือบทั้งแผ่นใบ
5	ความเป็นพิษต่อพืชรุนแรงมาก ใบพืชเหลืองหรือแห้งไหม้ทั้งใบ

หมายเหตุ : ดัดแปลงมาจาก Brown et al. (1991) และ Boutin et al. (2012)

หลังจากประเมินความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระด้วยสายตาภายหลังจากพืชได้รับแคดเมียมและสารอีทีไอแล้ว นำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การแสดงความพิษ โดยวิธีการมีดังนี้

$$\% \text{การแสดงความพิษ} = \frac{(A_0 \times B_0) + (A_1 \times B_1) + (A_2 \times B_2) + (A_3 \times B_3) + (A_4 \times B_4) + (A_5 \times B_5)}{(A_r \times B_r)} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

- เมื่อ
- A_0 คือ จำนวนใบของลักษณะพืชปกติ
 - B_0 คือ คะแนนความเป็นพิษ 0 คะแนน (พืชปกติ)
 - A_1 คือ จำนวนใบที่แผ่นใบเริ่มมีสีเหลืองหรือเหลืองซีด
 - B_1 คือ คะแนนความเป็นพิษ 1 คะแนน (แผ่นใบเริ่มมีสีเหลืองหรือเหลืองซีด)
 - A_2 คือ จำนวนใบที่ลักษณะการแสดงความพิษเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แผ่นใบเหลืองหรือเหลืองซีด
 - B_2 คือ คะแนนความเป็นพิษ 2 คะแนน (แผ่นใบเหลืองหรือเหลืองซีด)
 - A_3 คือ จำนวนใบที่ลักษณะการแสดงความพิษต่อพืชเพิ่มมากขึ้น แผ่นใบเหลืองหรือไหม้ 50 เปอร์เซ็นต์
 - B_3 คือ คะแนนความเป็นพิษ 3 คะแนน (แผ่นใบเหลืองหรือไหม้ 50 เปอร์เซ็นต์)
 - A_4 คือ จำนวนใบที่ลักษณะการแสดงความพิษต่อพืชรุนแรง ใบเหลืองหรือไหม้เกือบทั้งแผ่นใบ
 - B_4 คือ คะแนนความเป็นพิษ 4 คะแนน (ใบเหลืองหรือไหม้เกือบทั้งแผ่นใบ)
 - A_5 คือ จำนวนใบที่ลักษณะการแสดงความพิษต่อพืชรุนแรงมาก ใบพืชเหลืองหรือแห้งไหม้ทั้งใบ
 - B_5 คือ คะแนนความเป็นพิษ 5 คะแนน (ใบพืชเหลืองหรือแห้งไหม้ทั้งใบ)
 - A_r คือ จำนวนใบทั้งหมด
 - B_r คือ คะแนนความเป็นพิษ 5 คะแนน (ใบพืชเหลืองหรือแห้งไหม้ทั้งใบ)

$$\text{การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (RGR)} = [\ln(W_2) - \ln(W_1)] / (t_2 - t_1) \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

- เมื่อ \ln คือ ลอการิทึมธรรมชาติ
 t_1 คือ วันที่เริ่มต้น
 t_2 คือ วันที่สิ้นสุดการทดลอง
 W_1 คือ น้ำหนักของพืชทดลองในวันที่เริ่มต้นการทดลอง (กรัม)
 W_2 คือ น้ำหนักของพืชทดลองในวันที่สิ้นสุดการทดลอง (กรัม)

- การวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในตัวอย่างพืชทดลอง 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนเหนือน้ำ (ต้น และใบ) และ ส่วนใต้น้ำ (ราก) โดยวิธีการย่อยด้วยกรดตามวิธี USEPA method 3052 (USEPA., 1996) หลังจากการย่อยทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็น 50 มิลลิลิตร และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดด้วย atomic absorption spectrometer (AAS) (ดังภาคผนวกที่ ก6)

- การวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในน้ำตัวอย่าง โดยวิธีการย่อยด้วยกรดตามวิธี USEPA method 3015A (USEPA., 1998) หลังจากการย่อยทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็น 50 มิลลิลิตร และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดด้วย atomic absorption spectrometer (AAS)

3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1) การเตรียมภาชนะทดลอง: ในการทดลองนี้ใช้ภาชนะพลาสติกหรือกระถางขนาด 1.5 ลิตร จำนวน 168 กระถาง

2) การเตรียมพืชทดลอง: ใช้หญ้าเนเปียร์แคระจากพื้นที่ที่ไม่มีการปนเปื้อนโดยนำท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระจากศูนย์วิจัยพืชอาหารสัตว์ จังหวัดนครราชสีมา มาปักชำเป็นเวลา 30-45 วัน

3) การเตรียมสารละลาย: การทดลองใช้สารละลายผสมแคดเมียมไนเตรด-อีดีทีเอ (Cd (NO₃)₂-EDTA) ที่เตรียมจากสารแคดเมียมไนเตรดและสารอีดีทีเอเกรดสำหรับการวิเคราะห์ ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมจากขั้นตอนการศึกษาเบื้องต้น

4) การปลูกและการดูแลรักษา: ทำการปลูกหญ้าเนเปียร์แคระในภาชนะ พลาสติกขนาด 1.5 ลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีการเติมอากาศร่วมด้วยตลอดระยะเวลาการทดลอง

5) การเก็บตัวอย่าง

- ตัวอย่างพืช ทำการเก็บตัวอย่างพืชทุกวันที่ 1, 7, 15, 22, 30, 37, 45, 52, 60, 67, 75, 82, 90, 97 และ 105 ของการทดลอง ทำการล้างตัวอย่างพืชด้วยน้ำประปา 2-3 ครั้ง และทำการล้างอีกครั้งด้วยน้ำกลั่น หลังจากนั้นนำพืชมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 2-3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการแยกพืชเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนเหนือน้ำ (ต้น และใบ) และส่วนใต้น้ำ (ราก)

นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2-3 วัน และนำมาชั่งน้ำหนักแห้งอีกครั้ง นอกจากนี้ตลอดระยะเวลาของการทดลองได้ทำสังเกตอาการความผิดปกติของพืชทดลองด้วย

- ตัวอย่างน้ำ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกวันที่ 1, 7, 15, 22, 30, 37, 45, 52, 60, 67, 75, 82, 90, 97 และ 105 ของการทดลอง ใส่ขวดขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด โดยขวดที่ 1 สำหรับทำการวิเคราะห์ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน และขวดที่ 2 ทำการเติมกรดไนตริกเข้มข้น 2-3 หยดเพื่อรักษาตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมด

6) การวิเคราะห์ตัวอย่าง

- ตัวอย่างพืช การวิเคราะห์ใช้วิธีเช่นเดียวกับการศึกษาเบื้องต้น
- สำหรับตัวอย่างพืชในส่วนที่ทำวิเคราะห์การกระจายตัวของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ ได้ทำการล้างด้วยน้ำประปา 2-3 ครั้ง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง จากนั้นทำการรักษาตัวอย่างการทำแห้งแบบแช่แข็ง และเก็บรักษาในตู้ดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้องจนกว่าทำการวิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์นั้นจะใช้ ลำแสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ สถาบันวิจัยที่ 6B (SR-XRF) และเครื่องเลเซอร์อะเบลชันอินดักทีฟลิวอิเดสแพลสมาสมาสสเปกโทรเมทรี (LA-ICP-MS) ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา สำหรับการวิเคราะห์ด้วยลำแสงซินโครตรอน เทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ ณ สถาบันวิจัยที่ 23A (TPS- x-ray nanoprobe) synchrotron radiation research center (NSRRC) ประเทศไทย
- ในส่วนของการศึกษาลักษณะโครงสร้าง และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคดเมียม และสารอินทรีย์ในหญ้าเนเปียร์แคระ ได้ทำการล้างพืชด้วยน้ำประปา 2-3 ครั้ง จากนั้นล้างน้ำกลั่นอีกครั้งแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1-2 วัน และนำมาบดให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วทำการอัดเม็ดตัวอย่าง และนำไปวิเคราะห์ด้วยลำแสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิค x-ray absorption near edge structure ณ สถาบันวิจัยที่ 44A (TPS quick-scanning x-ray absorption spectroscopy) synchrotron radiation research center (NSRRC) ประเทศไทย
- ตัวอย่างน้ำ ทำการวิเคราะห์ใช้วิธีการเช่นเดียวกับการศึกษาเบื้องต้น

3.3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลปริมาณการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระที่ได้จากการทดลองโดยใช้ analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลเป็นรายคู่ด้วยวิธีทางสถิติแบบ t นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของการสะสมแคดเมียมจากผลการศึกษาเบื้องต้น รวมถึงผลของระยะเวลาต่อการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระด้วยวิธีทางสถิติของ duncan's new multiple range test (DMRT) ทั้งนี้การวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ statistical package for the social Sciences (SPSS) (ดังภาคผนวกที่ ข)

บทที่ 4 ผลและวิจารณ์การทดลอง

การศึกษาผลของสารอิตีทีเอต่อกลไกการดูดดึงแคดเมียมจากน้ำเสียโดยหญ้าเนเปียร์แคะ ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การศึกษาเบื้องต้นเพื่อศึกษาความทนทาน การแสดงความเป็นพิษ การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคะที่มีต่อสารละลายแคดเมียม สารละลายอิตีทีเอ และสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและอิตีทีเอ และ 2) กลไกการสะสม การเคลื่อนที่ การกระจายตัวและรูปฟอร์มของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคะ โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อศึกษาความทนทาน การแสดงความเป็นพิษ และการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคะที่มีต่อสารละลายแคดเมียม สารละลายอิตีทีเอ และสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและอิตีทีเอ

การศึกษาความทนทาน การแสดงความเป็นพิษ และการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคะที่มีต่อสารละลายแคดเมียม สารละลายอิตีทีเอ และสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและอิตีทีเอ รวมถึงการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคะ ได้ทำการแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) ชุดการทดลองเพื่อหาระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมของแคดเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเปรียบเทียบระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 6 ระดับ คือ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 2) ชุดการทดลองเพื่อหาระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารอิตีทีเอ ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเปรียบเทียบสารอิตีทีเอที่ 6 ระดับความเข้มข้น คือ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 3) ชุดการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแคดเมียม และสารอิตีทีเอ ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเปรียบเทียบอัตราส่วนโมลแคดเมียมต่อโมลสารอิตีทีเอที่ 3 อัตราส่วน คือ 1:0.5, 1:1 และ 1:2 โมล โดยใช้ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 1.2 ลิตรต่อกระถาง และปลูกหญ้าเนเปียร์แคะเป็นเวลา 45 วัน ทำการเก็บตัวอย่างในวันที่ 15, 30 และ 45 วัน ของการทดลอง โดยวิเคราะห์อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ เปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษ และปริมาณแคดเมียมทั้งหมดโดยสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1.1 ผลของแคดเมียมต่อลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสีย

1) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (potential of hydrogen ion; pH)

ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1.2 ลิตรต่อภาชนะทดลอง โดยเติมสารละลายแคดเมียมในเตรตในแต่ละชุดการทดลอง ที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อเริ่มต้นการทดลองค่าความเป็นกรดเป็นด่างของทุกชุดการ

ทดลองอยู่ในช่วง 6.59-6.72 หรือมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 6.72 ± 0.10 , 6.69 ± 0.02 , 6.69 ± 0.04 , 6.66 ± 0.06 , 6.60 ± 0.02 และ 6.59 ± 0.03 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณแคะเดเมียมที่เติมลงไปใต้น้ำเสียมีปริมาณน้อย หากแต่เมื่อพิจารณาโดยละเอียดจะเห็นได้ว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากแคะเดเมียมในเตรตมีความเป็นกรดอ่อนๆ และเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของทุกชุดการทดลองอยู่ในช่วง 6.63-7.69 หรือมีค่าเฉลี่ย 7.69 ± 0.01 , 7.25 ± 0.01 , 7.24 ± 0.07 , 7.01 ± 0.05 , 6.69 ± 0.04 และ 6.63 ± 0.02 ตามลำดับ ทั้งการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรดเป็นด่าง อาจมีผลมาจากการเติมอากาศตลอดการทดลองซึ่งส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายในน้ำมีปริมาณลดลงจึงส่งผลให้ค่าความเป็นกรดต่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อละลายน้ำจะอยู่ในรูปของกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3 , Carbonic acid) ทั้งนี้เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำลดลงจึงกล่าวได้ว่าปริมาณกรดคาร์บอนิกลดลงไปด้วย จึงส่งผลให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้น (Saha et al., 2017; Wadeesirisak and Sampanpanish, 2007)

ตารางที่ 4.1 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมแคะเดเมียมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

ระดับความเข้มข้นของแคะเดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (potential of hydrogen ion; pH)			
	0 วัน	15 วัน	30 วัน	45 วัน
0	6.72 ± 0.10^a	6.90 ± 0.09^a	7.23 ± 0.03^a	7.69 ± 0.01^a
20	6.69 ± 0.02^a	6.98 ± 0.04^a	7.09 ± 0.02^b	7.25 ± 0.01^b
40	6.69 ± 0.04^a	6.72 ± 0.01^a	6.96 ± 0.04^c	7.24 ± 0.07^b
60	6.66 ± 0.06^a	6.72 ± 0.05^a	6.84 ± 0.01^d	7.01 ± 0.05^c
80	6.60 ± 0.02^{ab}	6.66 ± 0.06^a	6.65 ± 0.07^e	6.69 ± 0.04^c
100	6.59 ± 0.03^b	6.61 ± 0.02^a	6.64 ± 0.10^e	6.63 ± 0.02^d

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2) ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity; EC)

เมื่อเริ่มต้นการทดลองได้มีการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียที่มีการเติมสารละลายแคะเดเมียมในเตรต ที่ 6 ระดับความเข้มข้น คือ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของชุดการทดลองควบคุมที่ไม่มีการเติมสารละลายแคะเดเมียมในเตรตมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ

264.12±22.46 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และค่าการนำไฟฟ้าในชุดการทดลองการเติมสารละลาย แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ระดับความเข้มข้น คือ 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรอยู่ในช่วง 1701.04–1869.59 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร หรือมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 264.12±22.46, 1701.04±42.44, 1704.03±23.23, 1759.42±36.61, 1866.60±40.02 และ 1869.59±27.03 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชุดการทดลองควบคุม และชุดการทดลองการเติมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์พบว่า การเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า และพบว่า เมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มลดลง ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

ระดับความ เข้มข้นของ แคลเซียม (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity; EC) ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร			
	0 วัน	15 วัน	30 วัน	45 วัน
0	264.12±22.46 ^a	260.10±18.15 ^a	256.12±19.63 ^a	237.69±12.79 ^a
20	1701.04±42.44 ^b	1693.78±19.89 ^b	1548.14±25.78 ^b	1483.25±31.16 ^b
40	1704.03±23.23 ^b	1685.72±20.63 ^b	1521.96±14.23 ^b	1479.12±35.42 ^b
60	1759.42±36.61 ^b	1656.72±14.72 ^b	1547.88±23.16 ^b	1498.01±26.23 ^b
80	1866.60±40.02 ^c	1789.66±22.61 ^c	1678.54±24.27 ^c	1669.23±24.27 ^c
100	1869.59±0.03 ^c	1896.61±32.73 ^d	1786.64±27.10 ^d	1703.61±36.12 ^c

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1479.12-1703.61 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร หรือมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1483.25±31.16, 1479.12±35.42, 1498.01±26.23, 1669.23±24.27 และ 1703.61±36.12 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับของความเข้มข้น 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ยกเว้นในชุดควบคุมที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 237.69±12.79 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าเมื่อเริ่มต้นการทดลอง และสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าในแต่ละชุดการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยค่าการนำไฟฟ้าที่ลดลงเป็นผลมาจากการที่พืชดูดตั้งไอออนบวก หรือแคลเซียมไอออนไปสะสมไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช (Salimi et al., 2012; Sampanpanish and Pinpa, 2017)

3) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction potential; ORP)

ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน เมื่อเริ่มต้นการทดลองในน้ำเสียที่มีการเติมสารละลาย แคลเซียมไนเตรต 6 ระดับ คือ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 253.42–280.03 มิลลิโวลต์ หรือมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 253.42 ± 23.16 , 275.89 ± 12.47 , 284.38 ± 19.74 , 279.45 ± 17.61 , 266.79 ± 20.45 และ 289.03 ± 17.233 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โดยมีการเก็บตัวอย่าง ทุกๆ 15 วัน พบว่า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มคงที่ ดังตารางที่ 4.3 ทั้งนี้เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ค่าศักยภาพออกซิเดชัน-รีดักชันอยู่ในช่วง 267.62–273.45 มิลลิโวลต์ หรือมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 237.69 ± 19.69 , 267.62 ± 21.53 , 269.01 ± 25.14 , 273.45 ± 22.23 , 269.23 ± 15.17 และ 270.47 ± 16.32 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในน้ำที่มีการเติมแคลเซียมที่ระดับความเข้มข้น ต่างๆ

ระดับความ เข้มข้นของ แคลเซียม (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation reduction potential; ORP) (มิลลิโวลต์; mV)			
	0 วัน	15 วัน	30 วัน	45 วัน
0	253.42 ± 23.16^a	264.10 ± 20.42^a	286.15 ± 17.82^a	237.69 ± 19.69^a
20	275.89 ± 12.47^a	274.31 ± 21.24^a	275.34 ± 24.37^a	267.62 ± 21.53^a
40	284.38 ± 19.74^a	286.23 ± 17.01^a	268.70 ± 23.15^a	269.01 ± 25.14^a
60	279.45 ± 17.61^a	279.55 ± 16.72^a	275.63 ± 25.17^a	273.45 ± 22.23^a
80	266.79 ± 20.45^a	284.23 ± 19.28^a	261.37 ± 22.14^a	269.23 ± 15.17^a
100	289.03 ± 17.23^a	283.14 ± 14.63^a	286.42 ± 19.85^a	270.47 ± 16.32^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

โดยค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันมีค่า เป็นบวกตลอดระยะเวลาของการทดลอง เนื่องจากมีการเติมอากาศตลอดการทดลอง จึงส่งผลให้ไม่เกิดสภาวะรีดักชันของการทดลอง และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชุดการทดลองควบคุม และชุดการทดลองที่มีการเติมแคลเซียม พบว่า ชุดที่มีการเติมแคลเซียมมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน สูงกว่าชุดควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Good et al. (2011), Schön et al. (1993) และ Tananonchai and Sampanpanish (2014) ที่พบว่า เมื่อแคลเซียมละลายน้ำจะเกิดการแตกตัวเป็นแคลเซียมไดวาเลนต์ซึ่งมีบทบาทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้นการเติมแคลเซียมจึงมีผลต่อค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ที่เพิ่มขึ้น

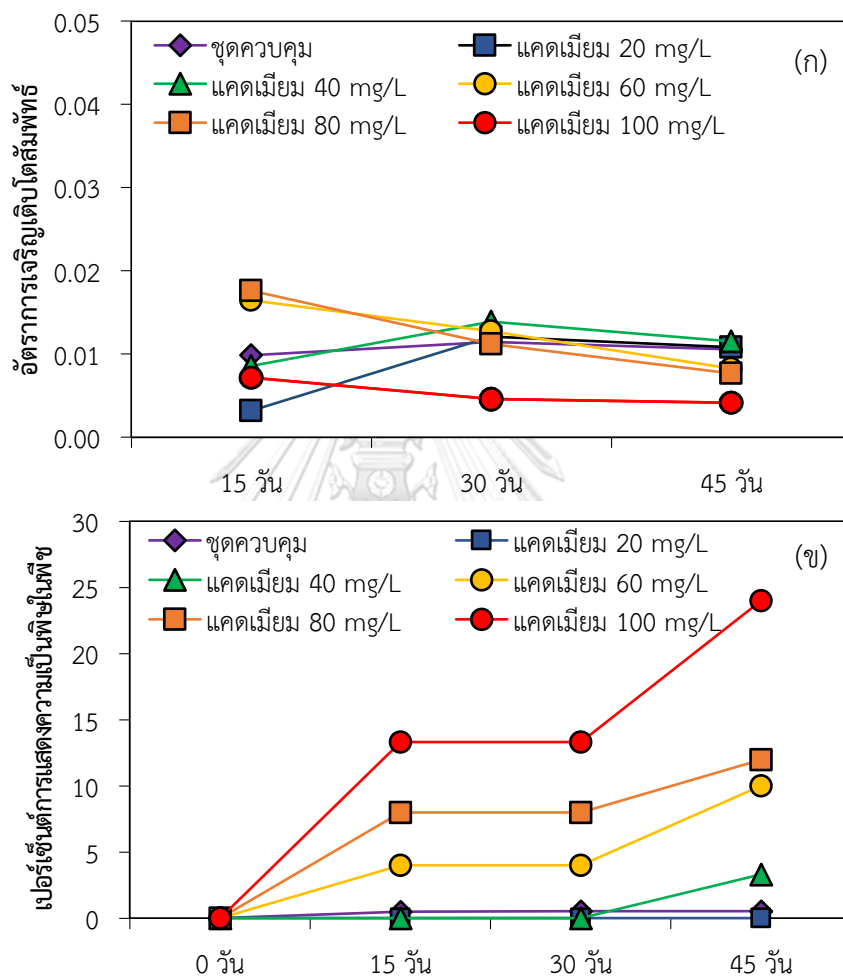
4.1.2 ผลของแคดเมียมต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์และการแสดงความเป็นพิษต่อพืช

การศึกษาเปรียบเทียบระดับความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม 6 ระดับความเข้มข้น คือ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยคัดเลือกพืชที่มีอายุ 45 วัน และมีขนาดใกล้เคียงกัน คือ มีน้ำหนักสดเฉลี่ยเมื่อเริ่มต้นการทดลองอยู่ในช่วง 40-45 กรัม (น้ำหนักสด) และทำการเก็บตัวอย่างที่ 15, 30 และ 45 วันของการทดลอง นำมาล้าง ผึ่งให้แห้ง และชั่งน้ำหนักสดแล้วนำไปคำนวณค่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของพืชทดลอง ผลการทดลอง พบว่า พืชมีการเจริญเติบโตสัมพัทธ์สูงสุดในช่วง 15 วันของการทดลอง โดยมีค่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ เท่ากับ 0.0098 ± 0.0011 , 0.0032 ± 0.0077 , 0.0086 ± 0.0071 , 0.0165 ± 0.0029 , 0.0176 ± 0.0015 , และ 0.0071 ± 0.0045 ตามลำดับ โดยอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ยกเว้นในชุดควบคุม และชุดการทดลองที่มีสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์เพียงเล็กน้อย โดยมีค่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์เมื่อสิ้นสุดการทดลอง เท่ากับ 0.0134 ± 0.0027 , 0.0121 ± 0.0031 และ 0.0139 ± 0.0020 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก)

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการแสดงความเป็นพิษ และการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของพืช พบว่า 15 วันแรกของการทดลอง พืชทดลองมีการแสดงความเป็นพิษต่ำ โดยชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น ได้แก่ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ค) มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษ เท่ากับ 0, 0, 0, 4.00 ± 4.02 , 8.00 ± 4.02 และ 13.34 ± 2.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพืชทดลองมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (45 วัน) มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษ เท่ากับ 0, 0, 3.34 ± 2.89 , 10.00 ± 2.00 , 12.00 ± 4.00 , และ 24.00 ± 4.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ พบว่า ชุดการทดลองที่มีสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการแสดงความเป็นพิษต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณการสะสมแคดเมียม โดยที่ชุดการทดลองที่มีสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือหน้า (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์ แคระต่ำกว่าชุดการทดลองที่มีสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ข)

ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Namdjoyan et al. (2011) และ Zhang et al. (2014) ที่พบว่า เมื่อระดับความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่ออัตราการเจริญเติบโตของพืช Safflower (*Carthamus tinctorius*) นอกจากนี้ Mosa et al. (2011) และ Hediji et al. (2010) ที่ทำการศึกษาและพบว่า พืชที่เจริญเติบโตในพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียม จะส่งผลให้พืชมีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง และทำให้พืชแสดงอาการใบเหลือง ใบไหม้ และ

ใบจุดออกมาได้ อาการดังกล่าวอาจเป็นผลมาจากสารละลายแคดเมียมที่ส่งผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง กระบวนการหายใจ และกระบวนการคายน้ำของพืชทดลองอันก่อให้เกิดความผิดปกติทางสรีรวิทยาของพืชทดลองเช่น การลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ หรือทำให้โครงสร้างคลอโรพลาสต์ผิดปกติ เป็นต้น (Fojtova and Kovarik, 2000; Paunov et al., 2018)

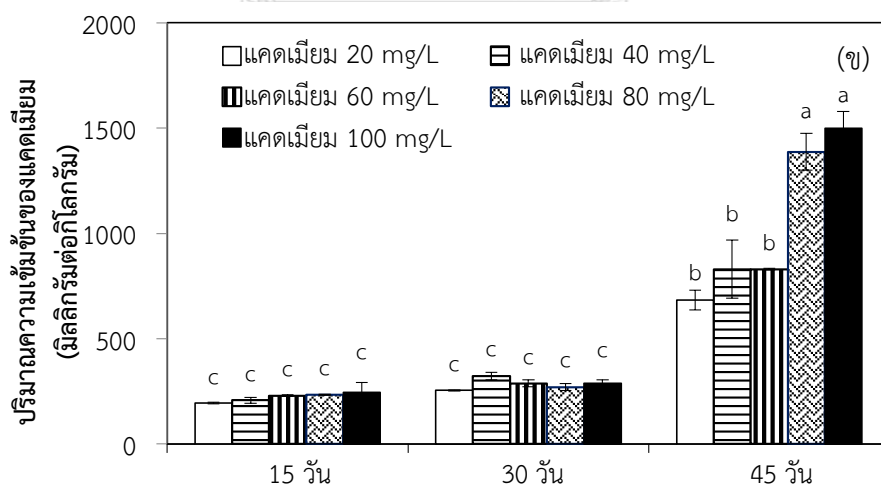
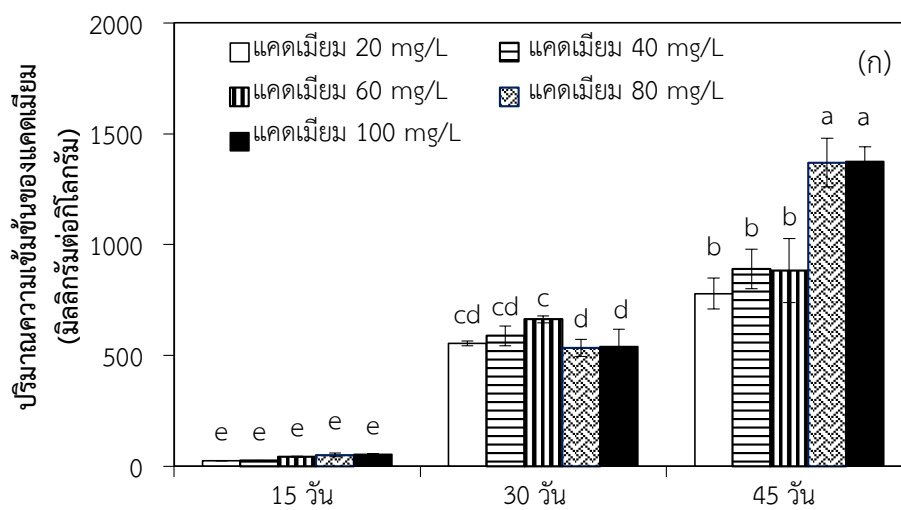


รูปที่ 4.1 (ก) ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมต่ออัตราการเจริญเติบโตใบคลอโรฟิลล์ และ (ข) การแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ

4.1.3 การดูดีงและสะสมแคดเมียมในพืชทดลอง

การศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในสารละลายแคดเมียม 6 ระดับความเข้มข้น คือ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเก็บตัวอย่างทุกวันที่ 15, 30, และ 45 ของการทดลอง ผลการทดลองพบว่า แคดเมียมส่วนใหญ่มีการสะสมอยู่ในส่วนใต้น้ำ (ราก) มากกว่าส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ใน 30 วันแรกของการทดลอง โดยมีค่าปริมาณการสะสมแคดเมียมอยู่ในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ $0, 553.68 \pm 11.19, 588.63 \pm 44.50, 662.96 \pm 15.52,$

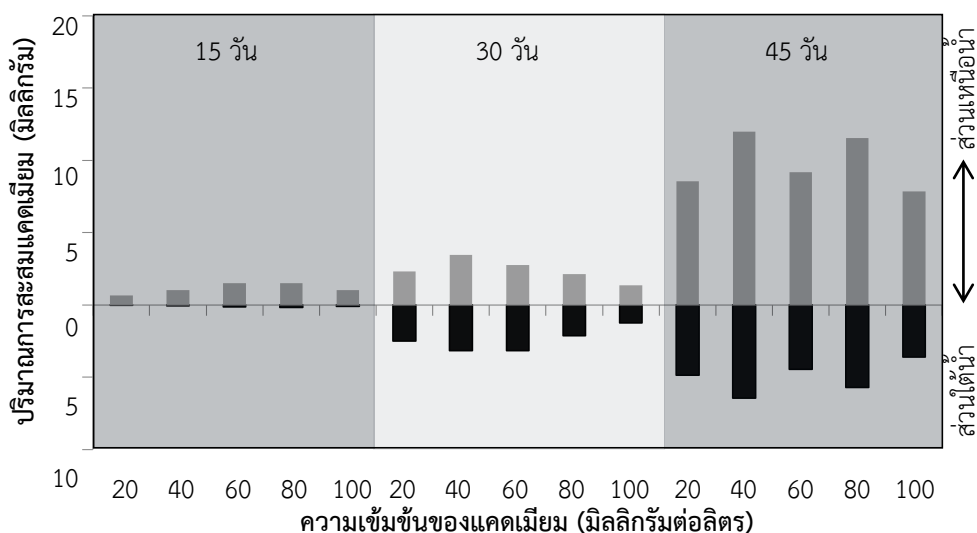
533.97±39.45 และ 539.23±78.36 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีค่าการสะสมแคดเมียมอยู่ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) เท่ากับ 0, 254.856±2.29, 323.09±18.28, 288.26±16.07, 270.61 ±16.53, และ 288.64±15.99 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า มีการสะสมแคดเมียมอยู่ในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 0, 779.05±69.51, 890.32±88.88, 883.08±144.65, 1369.38±109.48, และ 1374.35±67.69 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีการสะสมแคดเมียมอยู่ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) เท่ากับ 0, 683.85±45.99, 829.98±137.90, 911.74±3.32, 1387.39±87.07, และ 1499.06±80.80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 (ก) การสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และ (ข) การสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)

จากผลการศึกษาดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Wójcik et al. (2005) ที่มีการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียม ในพืช *Thlaspi caerulescens* ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการ

ปนเปื้อนของแคดเมียม 500 ไมโครโมลาร์ โดยผลการศึกษาดังกล่าวพบว่า พืชทดลองมีการสะสมแคดเมียมสูงในส่วนของรากพืช ทั้งนี้เพราะส่วนของรากมีการสัมผัสกับแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้โดยตรง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการสะสมแคดเมียมในแต่ละชุดการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองที่ปลูกพืชในสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พืชมีการสะสมแคดเมียมได้สูงกว่าชุดการทดลองอื่น โดยมีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีการสะสมแคดเมียมอยู่ในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีค่าเท่ากับ 1,374 และ 1,369 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (รูปที่ 4.2(ก)) และในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) มีค่าเท่ากับ 1,499 และ 1,487 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (รูปที่ 4.2(ข)) ผลการทดลองในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Kongmuang and Sampanpanish (2010) และ Mishra and Tripathi (2009) ซึ่งพบว่า พืชมีการสะสมแคดเมียมอยู่ในส่วนใต้น้ำ (ราก) สูงกว่าส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ทั้งนี้เนื่องจากส่วนใต้น้ำโดยเฉพาะรากเป็นส่วนที่สัมผัส และดูดดึงแคดเมียมโดยตรงก่อนที่จะลำเลียงผ่านท่อลำเลียงน้ำ และอาหารสู่ลำต้นและใบต่อไป



รูปที่ 4.3 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าน้ำเป็ยร์แคระ

การศึกษาสถานะที่เหมาะสมของหญ้าน้ำเป็ยร์แคระต่อระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 6 ระดับ คือ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการเก็บตัวอย่างที่ 15, 30 และ 45 วันของการทดลอง ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในหญ้าน้ำเป็ยร์แคระแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมที่เติมในชุดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kongmuang and Sampanpanish (2010) ที่ศึกษาการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยต้นผักตบชวา และพบว่า ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น

ส่งผลให้ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในต้นผักตบชวาเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคะจะมีค่าสูงสุดที่ชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมระดับความเข้มข้น 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรก็ตาม หากแต่เมื่อพิจารณาปริมาณมวลชีวภาพที่เพิ่มขึ้น และนำมาคำนวณในรูปแบบของสมมูลมวลสารเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุด โดยมีการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 11.99 ± 0.50 , และ 6.43 ± 0.10 มิลลิกรัม ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคะ ที่มีการเจริญเติบโตและมีอัตราการเพิ่มของมวลชีวภาพในส่วนของลำต้นและใบ สูงกว่าในส่วนราก ดังนั้นจึงเลือกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการศึกษาทดลองขั้นต่อไป

4.1.4 ผลของสารอีดีทีเอต่อลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสีย

1) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (potential of hydrogen ion; pH)

เมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรดเป็นด่างในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0, 20, 40, 60, 80, และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเริ่มต้นการทดลอง พบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของทุกชุดการทดลองอยู่ในช่วง 6.72-7.04 หรือมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 6.72 ± 0.10 , 6.78 ± 0.07 , 6.78 ± 0.05 , 7.01 ± 0.09 , 6.95 ± 0.04 และ 7.04 ± 0.01 ทั้งนี้เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของทุกชุดการทดลองอยู่ในช่วง 6.69-7.69 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.69 ± 0.01 , 6.69 ± 0.04 , 6.88 ± 0.04 , 7.02 ± 0.03 , 7.04 ± 0.01 และ 6.93 ± 0.02 ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย หากแต่เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์โดยรวมพบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการเติมสารอีดีทีเอเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากสารอีดีทีเอมีค่าของความเป็นด่างอ่อนๆ จึงส่งผลต่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างไม่เด่นชัดมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารอีดีทีเอที่ใช้เป็นปริมาณที่ค่อนข้างน้อย

2) ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity; EC)

ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติมสารละลายอีดีทีเอที่ 6 ระดับความเข้มข้น คือ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าเมื่อเริ่มต้นการทดลอง พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ของชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 264.12 ± 22.46 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายอีดีทีเอ 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 664.18-1689.79 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร หรือมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 664.18 ± 30.75 , 682.10 ± 12.78 , 683.21 ± 29.19 , 681.95 ± 21.54 และ 689.79 ± 20.99 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.5 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ในวันที่ 45 ของการทดลอง ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ของชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 237.69 ± 12.79 ไมโครซีเมนต์ต่อ และชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายอีดีทีเอ 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 892.62-

987.16 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 587.16 ± 32.04 , 586.91 ± 20.74 , 507.77 ± 18.13 , 492.62 ± 15.32 และ 469.93 ± 20.78 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

ระดับความ เข้มข้นของ อีดีทีเอ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (potential of hydrogen ion; pH)			
	0 วัน	15 วัน	30 วัน	45 วัน
0	6.72 ± 0.10^a	6.90 ± 0.09^a	7.23 ± 0.03^a	7.69 ± 0.01^a
20	6.78 ± 0.07^a	6.71 ± 0.05^a	6.69 ± 0.02^b	6.69 ± 0.04^b
40	6.78 ± 0.05^a	6.72 ± 0.06^a	6.88 ± 0.04^c	6.88 ± 0.04^c
60	7.01 ± 0.09^b	6.96 ± 0.07^a	6.98 ± 0.01^c	7.02 ± 0.03^d
80	6.95 ± 0.04^b	6.74 ± 0.06^a	6.69 ± 0.07^b	7.04 ± 0.01^d
100	7.04 ± 0.01^b	7.02 ± 0.09^a	6.96 ± 0.10^c	6.93 ± 0.02^e

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.5 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

ระดับความ เข้มข้นของ อีดีทีเอ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity; EC) ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร			
	0 วัน	15 วัน	30 วัน	45 วัน
0	264.12 ± 22.46^a	260.10 ± 18.15^a	256.12 ± 19.63^a	237.69 ± 12.79^a
20	664.18 ± 30.75^b	565.51 ± 28.59^b	516.23 ± 26.42^b	587.16 ± 32.04^b
40	682.10 ± 12.78^b	576.02 ± 31.11^b	588.24 ± 26.14^b	586.91 ± 20.74^b
60	683.21 ± 29.19^b	586.06 ± 25.37^b	580.24 ± 12.19^b	507.77 ± 18.13^b
80	681.95 ± 21.54^b	599.27 ± 19.96^b	589.63 ± 31.71^b	492.62 ± 15.32^b
100	689.79 ± 20.99^c	606.97 ± 30.09^c	596.95 ± 30.63^b	469.93 ± 20.78^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าเมื่อเริ่มต้นการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่าค่าการนำไฟฟ้าในแต่ละชุดการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากการเติมสารอีดีทีเอเป็นการเพิ่มปริมาณประจุในน้ำ ซึ่งจะเห็นได้จากตารางที่ 4.5 เมื่อเริ่มต้นการทดลองและมีการเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งการลดลงของค่าการนำไฟฟ้าคาดว่าจะเกิดจากปริมาณสารอีดีทีเอที่ลดลง เนื่องจากสารอีดีทีเอมีองค์ประกอบของธาตุไนโตรเจนซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักของพืช (Kongmuang and Sampanpanish, 2010)

3) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction potential; ORP)

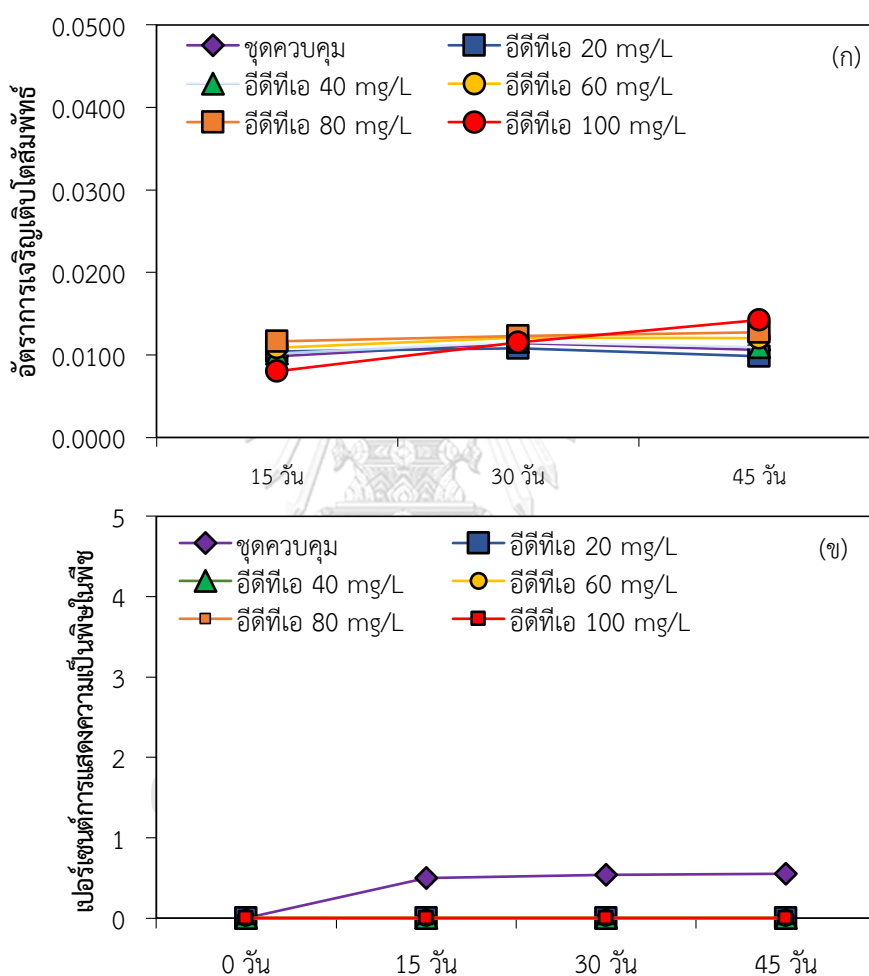
ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติมสารอีดีทีเอที่ 6 ระดับความเข้มข้น คือ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน อยู่ในช่วง 245.76-258.81 มิลลิโวลต์ หรือมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 253.42 ± 23.16 , 258.81 ± 13.75 , 255.72 ± 22.45 , 252.84 ± 27.63 , 248.76 ± 31.42 และ 245.76 ± 19.68 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.6 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน อยู่ในช่วง 237.69-278.95 มิลลิโวลต์ หรือมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 237.69 ± 19.69 , 278.95 ± 31.15 , 269.72 ± 21.24 , 259.07 ± 25.13 , 257.63 ± 21.62 และ 252.41 ± 19.77 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน เมื่อเริ่มต้นการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในแต่ละชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4.6 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

ระดับความเข้มข้นของอีดีทีเอ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation reduction potential; ORP) (มิลลิโวลต์; mV)			
	0 วัน	15 วัน	30 วัน	45 วัน
0	253.42 ± 23.16^a	260.10 ± 20.42^a	286.15 ± 17.82^a	237.69 ± 19.69^a
20	258.81 ± 13.75^a	264.21 ± 21.38^a	276.56 ± 27.35^a	278.95 ± 31.15^a
40	255.72 ± 22.45^a	257.48 ± 29.21^a	257.89 ± 25.14^a	269.72 ± 21.24^a
60	252.84 ± 27.63^a	254.63 ± 25.37^a	258.29 ± 21.29^a	259.07 ± 25.13^a
80	248.76 ± 31.42^a	249.45 ± 18.72^a	255.26 ± 20.61^a	257.63 ± 21.62^a
100	245.76 ± 19.68^a	246.17 ± 24.23^a	246.97 ± 18.98^a	252.41 ± 19.77^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.1.5 ผลของสารอีดีทีเอต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์และการแสดงความเป็นพิษต่อพืช จากการศึกษาค่าผลของอีดีทีเอต่อความเป็นพิษของพืชเมื่อเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่า สารอีดีทีเอไม่ส่งผลต่อการแสดงความเป็นพิษต่อหญ้าเนเปียร์แคระ ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) และเมื่อพิจารณาอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระ พบว่า ในทุกชุดการทดลองหญ้าเนเปียร์แคระมีค่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ข)



รูปที่ 4.4 (ก) ระดับความเข้มข้นของอีดีทีเอต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ และ (ข) การแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ

ดังนั้นจากการศึกษาในครั้งนี้ สามารถแสดงให้เห็นได้ว่า หญ้าเนเปียร์แคระอาจมีความทนทานต่อระดับความเข้มข้นของอีดีทีเอมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Van Engelen et al. (2011) และ Hernandez-Allica et al. (2007) ที่ทำการศึกษา และระบุว่า สารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้นไม่สูงเกินไปจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพของพืช และเมื่อสารอีดีทีเอเกิดการสลายตัวจะให้ธาตุอาหารออกมาด้วย

4.1.6 ผลของการเติมสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสารอีดีทีเอต่อลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสีย

1) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (potential of hydrogen ion; pH)

ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1.2 ลิตรต่อภาชนะทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:0.5, 1:1 และ 1:2 โมล ผลการศึกษาเมื่อเริ่มต้นการทดลองพบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีค่าเท่ากับ 6.42 ± 0.07 , 6.48 ± 0.02 และ 6.55 ± 0.05 ตามลำดับ โดยค่าความเป็นกรดเป็นด่างดังกล่าวมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังตารางที่ 4.7 และเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีค่าเท่ากับ 6.49 ± 0.02 , 6.69 ± 0.04 และ 6.88 ± 0.04 ตามลำดับของอัตราส่วน โดยค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลมาจากการทดลองที่มีการเติมอากาศตลอดการทดลอง ซึ่งอาจส่งผลต่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำที่ทำให้เกิดการรบกวนของสมดุลของคาร์บอเนตในน้ำ จึงอาจทำให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้น (Wadeesirisak and Sampanpanish, 2007)

ตารางที่ 4.7 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสารอีดีทีเอ

อัตราส่วน โมลของ แคดเมียม: สารอีดีทีเอ	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (potential of hydrogen ion; pH)			
	0 วัน	15 วัน	30 วัน	45 วัน
1:0.5 โมล	6.42 ± 0.07^a	6.35 ± 0.02^a	6.32 ± 0.01^a	6.49 ± 0.02^a
1:1 โมล	6.48 ± 0.02^a	6.25 ± 0.05^b	6.35 ± 0.02^a	6.69 ± 0.04^b
1:2 โมล	6.55 ± 0.05^a	6.42 ± 0.07^a	6.38 ± 0.03^a	6.88 ± 0.04^c

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2) ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity; EC)

ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:0.5, 1:1 และ 1:2 โมล ผลการศึกษา เมื่อเริ่มต้นการทดลองพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าทั้ง 3 ชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 683.74-625.73 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 683.74 ± 16.21 , 694.13 ± 22.19 และ 625.73 ± 11.62 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.8 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 672.76-605.74 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 672.76 ± 15.56 , 680.98 ± 13.56 และ 605.74 ± 11.98 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ โดย

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าเมื่อเริ่มต้นการทดลอง กับเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าในแต่ละชุดการทดลองมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย หากแต่เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่มีการเติมสารแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล พบว่ามีค่าการนำไฟฟ้าต่ำที่สุดเมื่อสิ้นสุดการทดลอง อันเนื่องมาจากชุดการทดลองดังกล่าว ฐานเนเปียร์แคระมีค่าการดูดซับสารอีดีทีเอไปสะสมในส่วนต่างๆ ของพืชได้สูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ จึงทำให้ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลง ซึ่งไอออนดังกล่าวจะแปรผันตรงกับค่าการนำไฟฟ้า (Suksawat, 2002; Tananonchai and Sampanpanish, 2014)

3) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation reduction potential; ORP)

เมื่อพิจารณาค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:0.5, 1:1 และ 1:2 โมลแคดเมียม : โมลสารอีดีทีเอ โดยเมื่อเริ่มต้นการทดลองพบว่า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ทั้ง 3 ชุดการทดลอง มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน เฉลี่ย 262.74-285.32 มิลลิโวลต์ หรือมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 262.74 ± 24.62 , 263.15 ± 23.46 และ 285.32 ± 21.23 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.9 และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง หรือ 45 วันของการทดลองพบว่า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันอยู่ในช่วง 288.13-289.98 มิลลิโวลต์ หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 289.04 ± 19.50 , 288.13 ± 18.34 และ 289.98 ± 17.62 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียที่มีการเติมสารละลายผสมระหว่างสารละลายแคดเมียมและสารอีดีทีเอ

อัตราส่วน โมลของ แคดเมียม: สารอีดีทีเอ	ค่าความการนำไฟฟ้า (electrical conductivity; EC) (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)			
	0 วัน	15 วัน	30 วัน	45 วัน
1:0.5 โมล	683.74 ± 16.21^a	681.49 ± 14.09^a	677.59 ± 13.79^a	672.76 ± 15.56^a
1:1 โมล	694.13 ± 22.19^a	684.23 ± 17.95^a	682.35 ± 11.53^a	680.98 ± 13.56^a
1:2 โมล	625.73 ± 11.62^a	619.43 ± 11.60^b	608.08 ± 12.87^b	605.74 ± 11.98^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันเมื่อเริ่มต้นการทดลองกับเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันแต่ละชุดการทดลองมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า การเติมสารแคดเมียมร่วมกับอีดีทีเอที่อัตราส่วนโมลต่างๆ มีส่วนในการเพิ่มค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน โดยผลการศึกษาดังกล่าวมี

ความสอดคล้องกับการศึกษาของ Sampanpanish and Pinpa (2017) ที่พบว่า การเติมสารคีเลต เป็นปัจจัยหนึ่งในการเพิ่มค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน

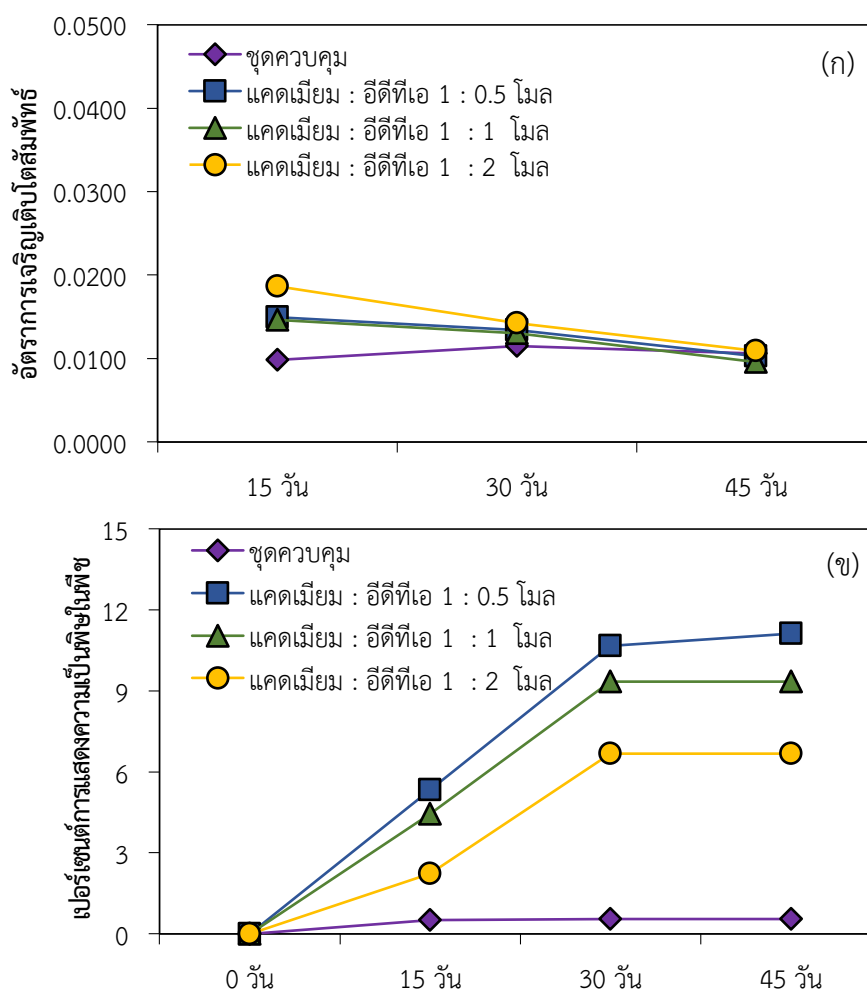
ตารางที่ 4.9 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมสารละลายผสมระหว่างแคดเมียม ร่วมกับสารอีดีทีเอ

อัตราส่วน โมลของ แคดเมียม: สารอีดีทีเอ	ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation reduction potential; ORP) (มิลลิโวลต์; mV)			
	0 วัน	15 วัน	30 วัน	45 วัน
1:0.5 โมล	262.74±24.62 ^a	281.49±21.23 ^a	286.14±18.92 ^a	289.04±19.50 ^a
1:1 โมล	263.15±23.46 ^a	281.93±20.87 ^a	284.23±19.63 ^a	288.13±18.34 ^a
1:2 โมล	285.32±21.23 ^a	289.78±21.05 ^b	285.62±22.64 ^b	289.98±17.62 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

4.1.7 ผลของสารละลายผสมระหว่างแคดเมียม และสารละลายอีดีทีเอ ต่ออัตราการเจริญเติบโต สัมพันธ์ และการแสดงความเป็นพิษต่อพืช

จากการศึกษาผลของการเติมสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมร่วมกับสารละลายอีดีทีเอต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพันธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระโดย เตรีียมสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมสารอีดีทีเอโดยใช้อัตราส่วนโมลของแคดเมียมและสารอีดีทีเอ 1:0.5, 1:1 และ 1:2 โดยใช้พืชทดลองที่อายุ 45 วัน และมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยมีน้ำหนักสดเมื่อเริ่มต้นการทดลอง เท่ากับ 40-45 กรัม และทำการเก็บตัวอย่างที่ 15, 30 และ 45 วันของการทดลอง นำมาอบที่อุณหภูมิ 105°C และชั่งเพื่อหาค่าน้ำหนักแห้งแล้วนำไปคำนวณค่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพันธ์ของพืชทดลอง ผลการศึกษาพบว่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพันธ์มีค่าสูงในช่วง 15 วันแรกของการทดลอง โดยมีค่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพันธ์ เท่ากับ 0.0149±0.0051, 0.0147±0.0053 และ 0.0187±0.0030 ตามลำดับของอัตราส่วน ทั้งนี้อัตราการเจริญเติบโตสัมพันธ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (45 วัน) พบว่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพันธ์ มีค่าเท่ากับ 0.0103±0.0028, 0.0096±0.0017 และ 0.0109±0.0011 ตามลำดับ ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Jean et al. (2008) ที่พบว่า การเติมสารอีดีทีเอ และกรดซิตริก มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารโลหะหนักได้ หากแต่ก็ทำให้อัตราการเจริญเติบโตสัมพันธ์ของพืชลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการทดลองครั้งนี้พบว่า ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายอีดีทีเอในอัตราส่วนที่สูงขึ้น สามารถส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตสัมพันธ์ลดลง ดังรูปที่ 4.5(ก) และ 4.5(ข)



รูปที่ 4.5 (ก) ระดับความเข้มข้นของสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสารละลายอีดีทีเอ ต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพันธ์ และ (ข) การแสดงความเป็นพิษของหลุ่เนเปียร์แคะ

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการแสดงความเป็นพิษและการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของพืช พบว่า 15 วันแรกของการทดลอง พืชทดลองมีการแสดงความเป็นพิษต่ำ โดยชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอที่อัตราส่วน 1:0.5, 1:1 และ 1:2 โมล มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษเท่ากับ 5.33 ± 2.31 , 4.44 ± 3.85 และ 2.22 ± 3.85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพืชทดลองมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษของพืชทดลอง เท่ากับ 11.11 ± 1.92 , 9.33 ± 1.15 และ 6.67 ± 2.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารละลายอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 มีการแสดงความเป็นพิษต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Tananonchai and Sampanpanish (2018), Hernandez-Allica et al. (2007) และ Yoon et al. (2007) ที่มีการศึกษาโดยเพิ่มประสิทธิภาพการ

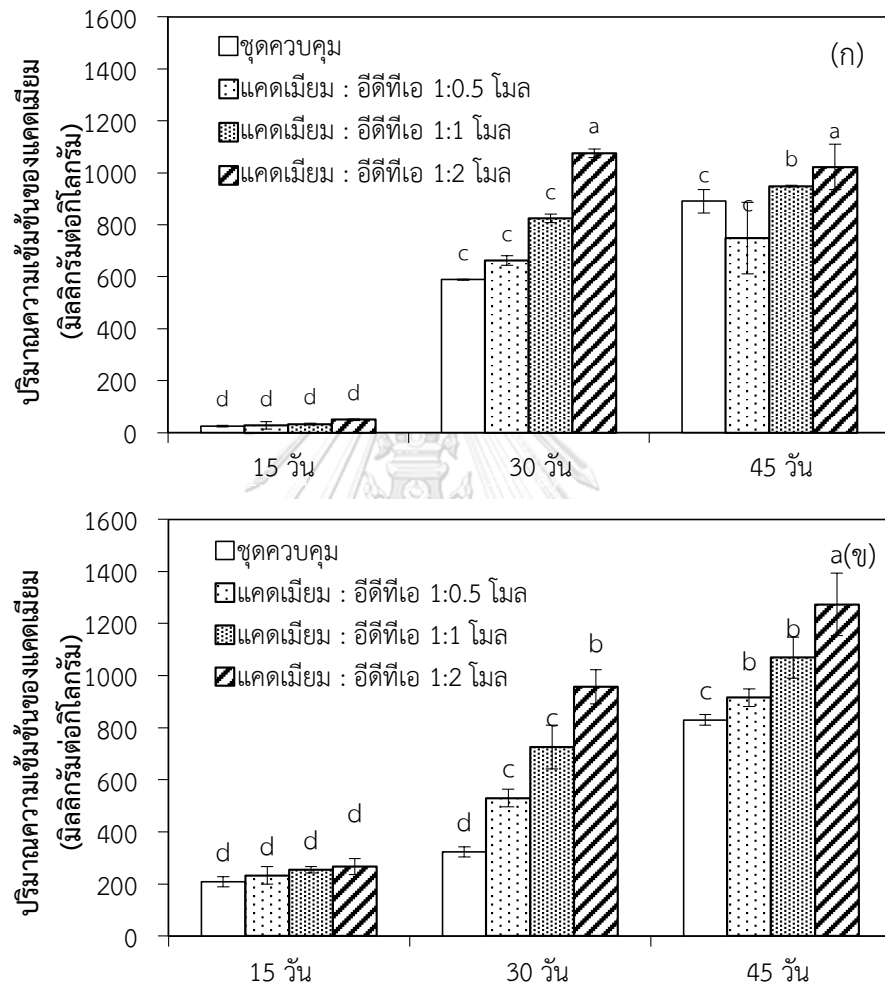
ดูดดึงแคดเมียมในพืชทดลอง โดยผลการศึกษาพบว่า การเติมสารละลายอีดีทีเอ มีบทบาทสำคัญในการล้อมไอออนอิสระของแคดเมียมในอัตราส่วน 1:1 โมล ส่งผลให้แคดเมียมอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคดเมียมและสารอีดีทีเอ ซึ่งส่งผลให้การแสดงความเข้มข้นของแคดเมียมลง (Guigan and Michael, 2012) นอกจากนี้การเติมสารละลายอีดีทีเอส่งผลให้พืชทดลองมีการดูดดึง และสะสมแคดเมียมในปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากสารอีดีทีเอจะเข้าไปเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแคดเมียมไอออนทำให้การเคลื่อนที่ของแคดเมียมจากเนื้อเยื่อชั้นนอกเข้าสู่เนื้อเยื่อชั้นในของพืชได้ดีขึ้น

4.1.8 ผลของสารละลายผสมระหว่างแคดเมียม และสารละลายอีดีทีเอ ต่อการดูดดึง และสะสมแคดเมียมในพืช

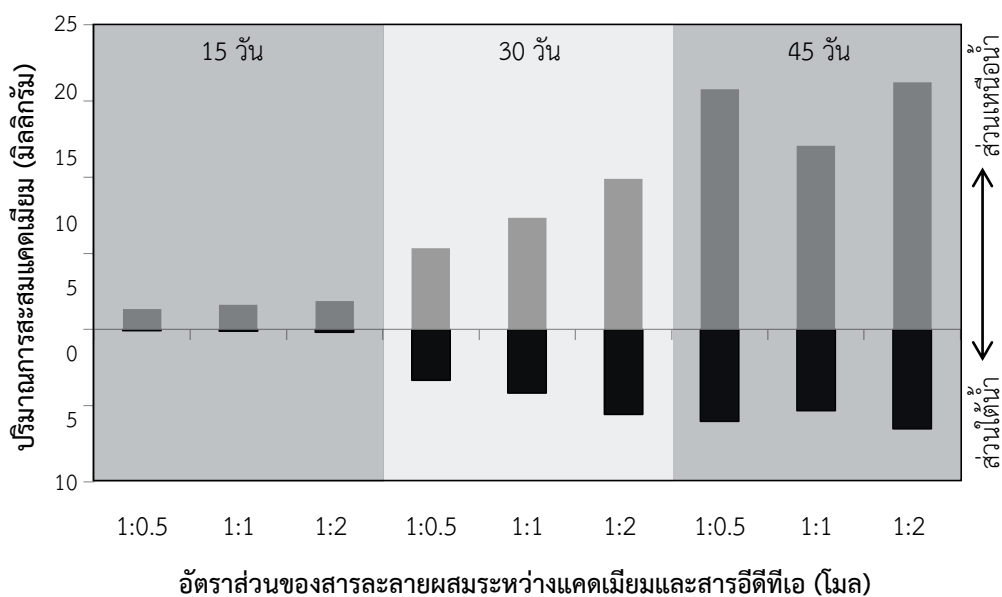
การศึกษาผลของการเติมสารละลายแคดเมียมและสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วนโมลเท่ากับ 1:0.5, 1:1 และ 1:2 ต่อปริมาณความเข้มข้นของการดูดดึงและสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ โดยได้ทำการเก็บตัวอย่างที่ 15, 30 และ 45 วันของการทดลอง ซึ่งผลของการเติมสารละลายอีดีทีเอต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของพืช พบว่า ปริมาณแคดเมียมในพืชทุกชุดของการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยช่วง 15 วันแรก ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 27.81 ± 2.64 , 32.54 ± 1.25 และ 50.23 ± 0.40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) มีค่าเท่ากับ 232.31 ± 5.03 , 253.70 ± 11.99 และ 267.08 ± 31.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีค่าเท่ากับ 748.47 ± 103.93 , 948.24 ± 16.83 และ 1022.22 ± 76.80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) มีค่าเท่ากับ 915.90 ± 81.15 , 1068.91 ± 77.97 และ 1273.31 ± 119.86 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับของอัตราส่วน และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ พบว่า มีการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) สูงกว่าในส่วนใต้น้ำ (ราก) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมและสารละลายอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:2 โมล โดยพบปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมมีการสะสมสูงที่สุด (ตั้งรูปที่ 4.6ก และ 4.6ข) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wu et al. (2004) ที่ทำการบำบัดโลหะหนักโดยใช้ต้น Chinese mustard (*Brassica juncea*) และมีการเติมสารอีดีทีเอร่วมด้วย ผลการศึกษาพบว่า สารอีดีทีเอมีส่วนสำคัญในการช่วยลดความเป็นพิษของแคดเมียม และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสะสมแคดเมียมในต้น Chinese mustard ด้วย

สำหรับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของหญ้าเนเปียร์แคระที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอในอัตราส่วนโมล เท่ากับ 1:0.5, 1:1 และ 1:2 และทำการเก็บตัวอย่างที่ 15, 30 และ 45 วันของการทดลอง ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระมีค่าสูงสุดที่ชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารละลายอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล และเมื่อพิจารณาปริมาณมวลชีวภาพที่เพิ่มขึ้น และนำมาคำนวณในรูปแบบของสมมูลมวลสาร เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 พืชทดลอง

มีการสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุดโดยมีการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 16.21 ± 0.10 , และ 6.51 ± 0.09 มิลลิกรัม ตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แควะที่มีการเจริญเติบโต และมีอัตราการเพิ่มของมวลชีวภาพในส่วนของลำต้น และใบได้สูงกว่าในส่วนราก ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 (ก) ผลของอีดีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และ (ข) ผลของอีดีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)



รูปที่ 4.7 ผลของการเติมแคลเซียมร่วมกับสารอีดีทีเอต่อปริมาณการสะสมแคลเซียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้น้ำ (ราก) หญ้าเนเปียร์แคระ

4.2 กลไกการสะสม การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของแคลเซียมในหญ้าเนเปียร์แคระ

จากผลการศึกษาความทนทาน การแสดงความเป็นพิษ และการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระที่มีต่อสารละลายแคลเซียม สารละลายอีดีทีเอ และสารละลายผสมระหว่างแคลเซียมและอีดีทีเอ รวมถึงการศึกษาปริมาณการสะสมแคลเซียมในหญ้าเนเปียร์แคระ โดยเก็บตัวอย่างในวันที่ 15, 30 และ 45 วัน ของการทดลอง จึงได้เลือกชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคลเซียมที่ระดับความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตรร่วมกับการเติมสารละลายอีดีทีเอ โดยใช้อัตราส่วนโมลระหว่างแคลเซียมและสารอีดีทีเอเท่ากับ 1:2 โมล เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่มีความเข้มข้นของแคลเซียมในพืชสูงที่สุด และมีการแสดงความเป็นพิษต่ำ และยังมีแนวโน้มของการลดลงของอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์น้อยกว่าชุดการทดลองอื่นๆ ซึ่งผลการทดลองกลไกการสะสม การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของแคลเซียมในพืช โดยเก็บตัวอย่างในวันที่ 7, 15, 22, 30, 37, 45, 52, 60, 67, 75, 82, 90, 97 และ 105 วัน ของการทดลอง สามารถสรุปได้ดังนี้

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำที่มีการเติมสารละลายผสมระหว่างแคลเซียมและสารละลายอีดีทีเอ

1) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (potential of hydrogen ion; pH)

การศึกษาริเปรียบเทียบความเป็นกรดเป็นด่างของชุดการทดลองที่มีการเติมแคลเซียม และชุดการทดลองที่มีการเติมแคลเซียมร่วมกับสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 พบว่า ค่าความเป็นกรดเป็น

ต่างเมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่าเท่ากับ 6.55 ± 0.02 และ 6.59 ± 0.05 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.10 เนื่องด้วยปริมาณสารอินทรีย์ที่เติมในอัตราส่วนโมลแล้วนั้นมีปริมาณน้อยมาก โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียม และชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอินทรีย์เอ มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง เท่ากับ 6.89 ± 0.03 และ 7.09 ± 0.01 ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างเป็นค่าความต่างในทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการทดลองที่มีการเติมอากาศตลอดการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำเสียสังเคราะห์ยังส่งผลโดยตรงต่อการจับตัวในรูปสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งมีรายงานว่าเมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีค่าเท่ากับ 4-6 สารอินทรีย์เอจะเริ่มเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ดี และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคดเมียม และสารอินทรีย์เอจะมีเสถียรภาพสูงเมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างอยู่ในช่วง 7-9 (Harvey, 2011)

ตารางที่ 4.10 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและสารละลายอินทรีย์เอ

ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง เป็นด่าง (potential of hydrogen ion; pH)	ชุดการทดลอง	
	ชุดที่มีการเติมแคดเมียม	ชุดที่มีการเติมแคดเมียมและสารอินทรีย์เอ ในอัตราส่วน 1:2 โมล
0 วัน	6.55 ± 0.02	6.59 ± 0.05
7 วัน	6.57 ± 0.01	6.57 ± 0.07
15 วัน	6.53 ± 0.08	6.84 ± 0.01
22 วัน	6.53 ± 0.05	6.83 ± 0.08
30 วัน	6.52 ± 0.04	6.90 ± 0.03
37 วัน	6.62 ± 0.09	6.87 ± 0.07
45 วัน	6.65 ± 0.11	6.88 ± 0.04
52 วัน	6.69 ± 0.03	6.90 ± 0.06
60 วัน	6.71 ± 0.07	6.89 ± 0.04
67 วัน	6.73 ± 0.04	6.95 ± 0.02
75 วัน	6.75 ± 0.02	6.97 ± 0.03
82 วัน	6.77 ± 0.01	6.84 ± 0.07
90 วัน	6.79 ± 0.05	6.99 ± 0.01
97 วัน	6.82 ± 0.09	7.05 ± 0.03
105 วัน	6.89 ± 0.03	7.09 ± 0.01

2) ค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity; EC)

การเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติมแคะเดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:2 ผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่มีการเติมแคะเดเมียมเมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าชุดการทดลองที่มีการเติมแคะเดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีการนำไฟฟ้าเฉลี่ย 765.42 ± 22.14 และ 602.48 ± 17.03 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ในวันที่ 105 วันของการทดลองพบว่า ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 342.35 ± 13.98 , และ 297.65 ± 15.61 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าตลอดระยะเวลาของการทดลองพบว่า ค่าการนำไฟฟ้ามีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของพืชทดลอง กล่าวคือเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นพืชทดลองมีการดูดตั้งโลหะหนักเข้าไปสะสมภายในราก ลำต้น และใบของพืชทดลองเพิ่มขึ้น ทำให้ไอออนบวกที่แปรผันตรงกับค่าการนำไฟฟ้าลดลง (Suksawat, 2002) โดยเฉพาะอย่างยิ่งชุดการทดลองที่มีการเติมแคะเดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:2 โมล มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่าชุดการทดลองที่มีการเติมแคะเดเมียมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียที่มีการเติมสารละลายผสมระหว่างแคะเดเมียม และสารละลายอีดีทีเอ

ค่าความการนำไฟฟ้า (electrical conductivity; EC)	ชุดการทดลอง	
	ชุดที่มีการเติมแคะเดเมียม	ชุดที่มีการเติมแคะเดเมียมและสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:2 โมล
0 วัน	765.42 ± 22.14	602.48 ± 17.03
7 วัน	721.34 ± 21.23	589.57 ± 14.23
15 วัน	698.99 ± 19.81	579.61 ± 15.42
22 วัน	659.33 ± 17.63	571.62 ± 16.48
30 วัน	610.54 ± 13.42	563.03 ± 13.67
37 วัน	589.12 ± 16.27	556.58 ± 19.04
45 วัน	536.57 ± 15.61	523.86 ± 17.23
52 วัน	516.39 ± 14.26	497.73 ± 13.46
60 วัน	496.92 ± 13.67	468.09 ± 15.12
67 วัน	488.84 ± 12.14	459.23 ± 18.23
75 วัน	459.97 ± 21.09	406.89 ± 12.14
82 วัน	418.14 ± 20.13	382.34 ± 11.26
90 วัน	385.14 ± 17.68	387.46 ± 9.23
97 วัน	356.72 ± 16.94	324.61 ± 18.34
105 วัน	342.35 ± 13.98	297.65 ± 15.61

3) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation reduction Potential; ORP)

การศึกษาเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในน้ำเสียสังเคราะห์ ชุดการทดลองที่มีการเติมแควตเมียม และชุดการทดลองที่เติมแควตเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมลแควตเมียม พบว่า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันเมื่อเริ่มต้นการทดลองทั้ง 2 ชุดการทดลอง มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 284.38 ± 11.21 และ 285.32 ± 11.27 มิลลิโวลต์ ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำเสียที่มีการเติมสารละลายผสมระหว่าง แควตเมียมและสารละลายอีดีทีเอ

ความต่างศักย์ ออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation reduction potential; ORP) (มิลลิโวลต์; mV))	ชุดการทดลอง	
	ชุดที่มีการเติมแควตเมียม	ชุดที่มีการเติมแควตเมียมและสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:2 โมล
0 วัน	284.38 ± 11.21	285.32 ± 11.27
7 วัน	285.34 ± 10.82	287.63 ± 14.25
15 วัน	286.23 ± 16.23	289.78 ± 19.87
22 วัน	275.89 ± 12.64	287.62 ± 21.01
30 วัน	268.70 ± 11.98	286.34 ± 17.68
37 วัน	269.03 ± 23.82	289.54 ± 13.12
45 วัน	269.01 ± 24.63	290.18 ± 12.10
52 วัน	287.39 ± 22.14	295.43 ± 11.98
60 วัน	294.92 ± 21.12	308.09 ± 12.04
67 วัน	313.84 ± 18.03	359.56 ± 14.13
75 วัน	328.97 ± 22.01	377.24 ± 17.69
82 วัน	356.14 ± 14.27	395.16 ± 19.32
90 วัน	378.14 ± 15.16	398.26 ± 18.13
97 วัน	386.42 ± 12.23	402.56 ± 13.87
105 วัน	385.56 ± 9.98	407.4 ± 10.978

เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 385.56 ± 9.98 และ 407.48 ± 10.97 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบค่าความ

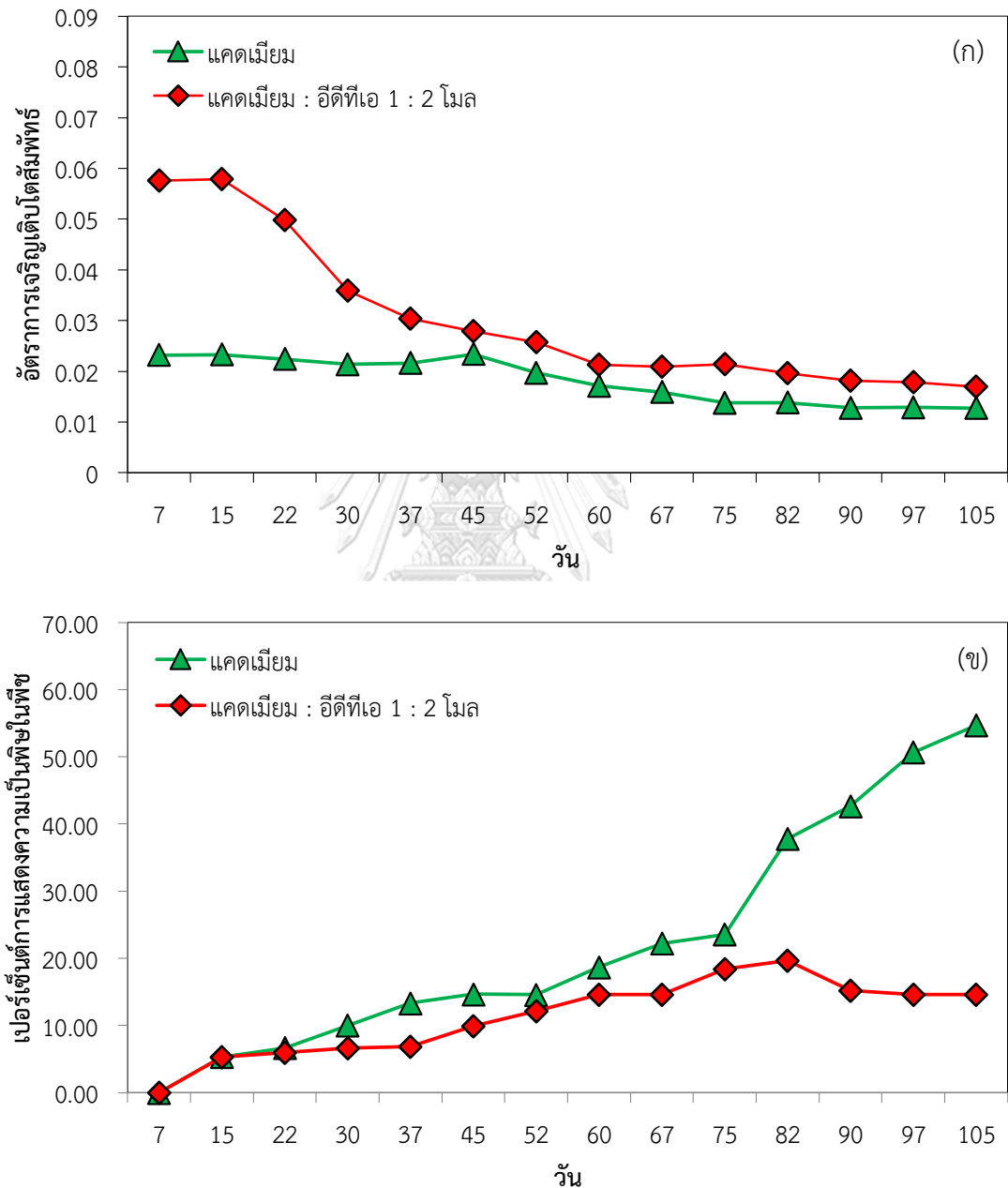
ต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ของสองชุดการทดลองจะเห็นได้ว่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอมีค่าสูงกว่าในชุดควบคุมหรือชุดการทดลองที่เติมแคดเมียมเพียงอย่างเดียว โดยผลการศึกษาดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Kongmuang and Sampanpanish (2010) ซึ่งพบว่า การเติมสารซีเลตมีส่วนเพิ่มค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำเสีย

4.2.2 ผลของสารแคดเมียม และอีดีทีเอ ต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ และการแสดงความเป็นพิษต่อพืช

การศึกษาอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้านาเปียร์แคระที่ปลูกในชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตรร่วมกับการเติมสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล ซึ่งเป็นการคำนวณการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพกับระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้น โดยมีการเก็บตัวอย่างทุกวันที่ 7, 15, 22, 30, 37, 45, 52, 60, 67, 75, 82, 90, 97 และ 105 วัน ผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล มีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์สูงกว่าชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมโดยไม่มีการเติมสารอีดีทีเอ ดังรูปที่ 4.8(ก)

จากรูปที่ 4.8 (ก) แสดงให้เห็นได้ว่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์มีค่าสูงขึ้นในช่วง 1-15 วันของการทดลอง โดยมีค่าเท่ากับ 0.0578 ± 0.0013 และค่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นพืชทดลองมีอัตราการเพิ่มมวลชีวภาพที่ลดลง จึงเป็นผลให้ค่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์มีแนวโน้มที่ลดลง ในขณะที่ชุดควบคุมหรือชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียม และไม่มีการเติมสารอีดีทีเอนั้น พบว่า มีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ที่คงที่เท่ากับ 0.0127 ± 0.0004 ถึง 0.0234 ± 0.0015 ตลอดระยะเวลาของการทดลอง นอกจากนี้ผลการศึกษาพบว่า การเติมสารอีดีทีเอ มีผลโดยตรงต่ออัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lu et al. (2004) ที่ได้ทำการศึกษาค่าของการกำจัดแคดเมียมด้วยผักตบชวา โดยพบว่า เมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของต้นผักตบชวาลดลงได้ สำหรับเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษของพืชทดลองสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมและสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล หญ้านาเปียร์แคระมีการแสดงความเป็นพิษตลอดการทดลองมีค่าเท่ากับ 0 ถึง 19.65 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมอย่างเดียว โดยพบการแสดงความเป็นพิษตลอดการทดลองมีค่าเท่ากับ 0 ถึง 54.67 เปอร์เซ็นต์ ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.8(ข) ยังพบว่า เมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะที่ 75 วัน หญ้านาเปียร์แคระในชุดการทดลองควบคุมหรือชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมอย่างเดียวมีการแสดงความเป็นพิษออกมาอย่างเห็นได้ชัดเจน และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษสูงกว่าในชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล ซึ่งผลการศึกษาในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับ

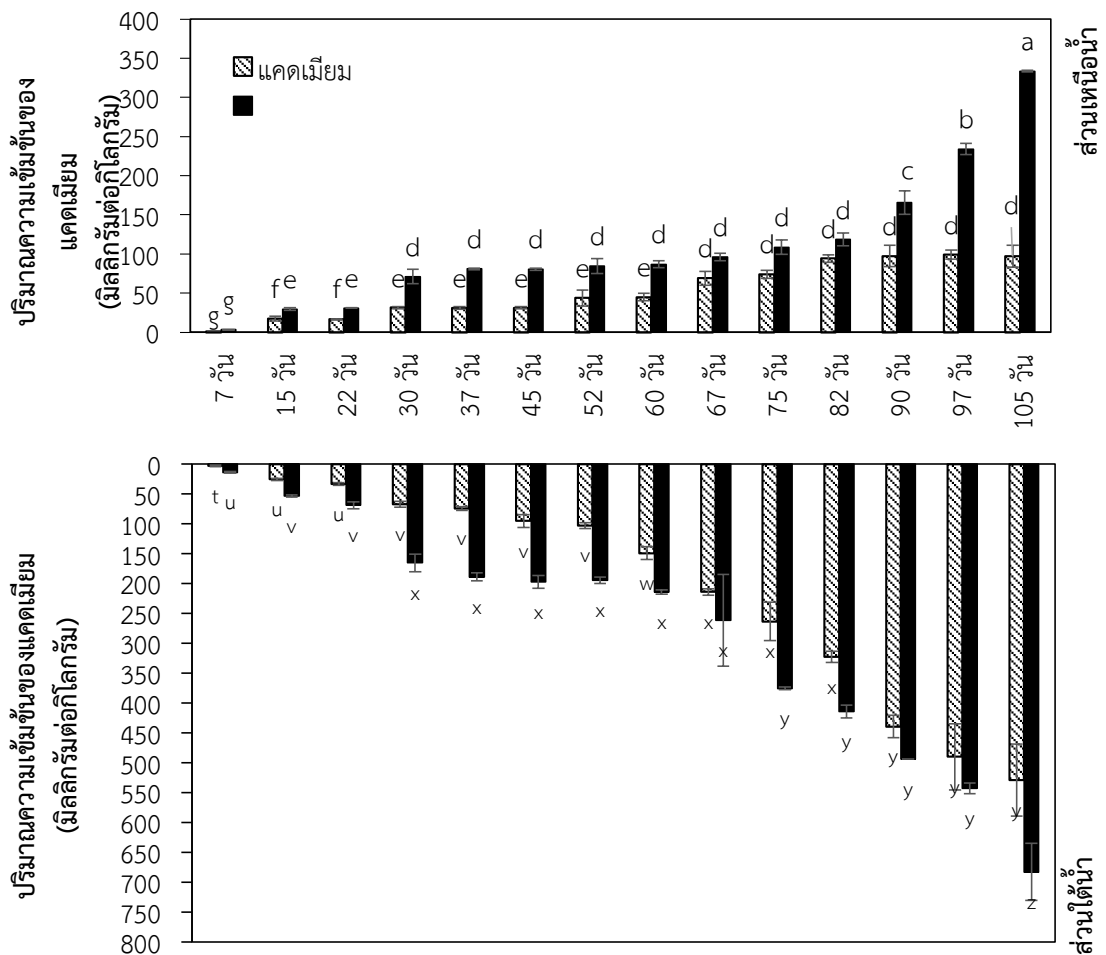
งานวิจัยของ Wu et al. (2004) ที่มีการศึกษาการบำบัดสารโลหะหนักด้วยผักกาดเขียวปลี ซึ่งมีการเติมสารอีดีทีเอร่วมด้วย ผลการทดลองพบว่า สารอีดีทีเอสามารถช่วยลดความเป็นพิษของโลหะหนักที่มีต่อผักกาดเขียวปลีได้ และยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมโลหะหนักในผักกาดเขียวปลีให้เพิ่มขึ้นได้



รูปที่ 4.8 (ก) อัตราการเจริญเติบโตสะสมพัทธ์ และ (ข) การแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ

4.2.3 ศักยภาพของสารอีดีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในพืช

ชุดการทดลองควบคุมหรือชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมเพียงอย่างเดียว และชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับการเติมสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในพืชทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกชุดการทดลอง โดยในช่วงแรกของการทดลอง (7 วัน) ชุดการทดลองควบคุมหรือชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมเพียงอย่างเดียว และชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 2.96 ± 1.49 และ 14.03 ± 1.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในส่วนใต้น้ำ (ลำต้น และใบ) เท่ากับ 1.01 ± 0.15 และ 3.10 ± 0.27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยทั้งสองชุดการทดลองมีปริมาณการสะสมแคดเมียมสูงสุดที่ 105 วัน ของการทดลอง



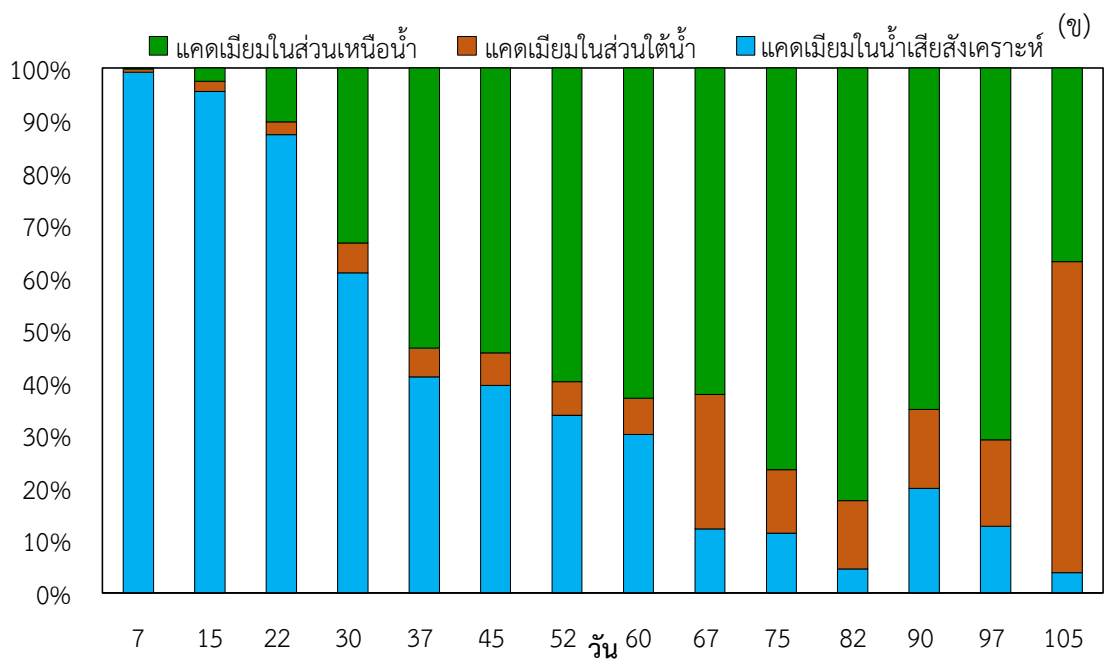
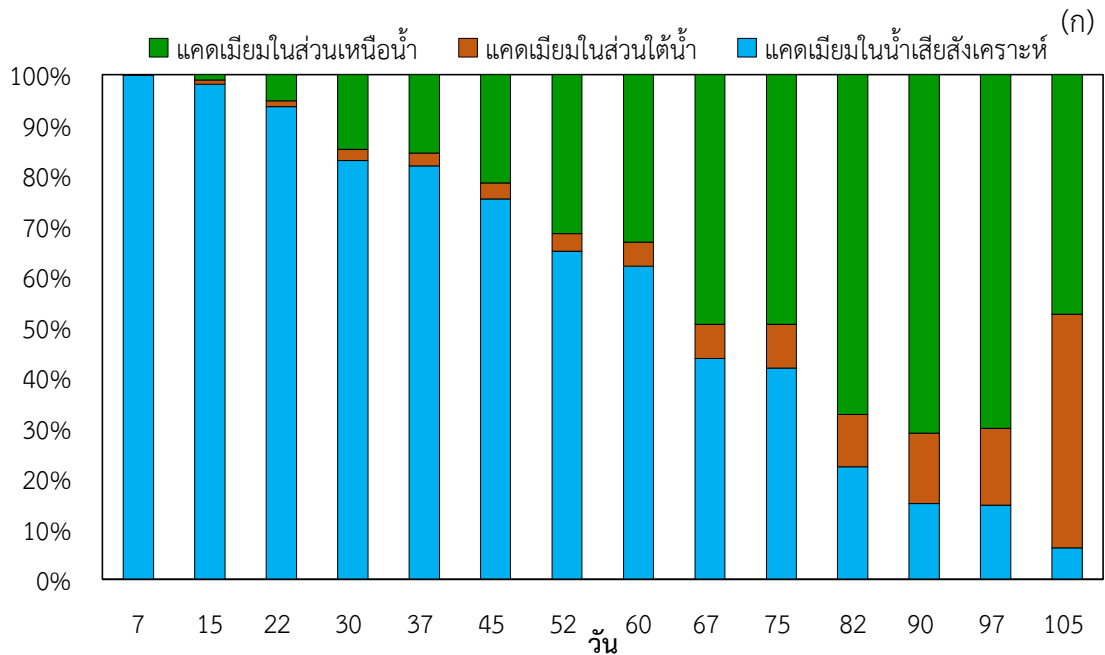
รูปที่ 4.9 ผลของอีดีทีเอต่อระดับการสะสมแคดเมียมในพริกเนเปียร์แคระ

โดยปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 529.30 ± 60.12 และ 682.70 ± 47.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในส่วนใต้น้ำ (ลำต้น และใบ) เท่ากับ 97.42 ± 13.99 และ

333.59±1.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบทั้งสองชุดการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับการเติมสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล มีปริมาณการสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุดที่ระยะเวลาของการทดลอง 105 วัน โดยมีค่าการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) สูงกว่าในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Hernandez-Allica et al. (2007) ที่พบว่า สารอีดีทีเอส่งผลดีต่อต้นอาร์ทิโชก (*Cynara cardunculus*) ที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม นอกจากนี้ยังมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Muhammad et al. (2009) ที่พบว่า อีดีทีเอมีความเหมาะสมในการช่วยลดความเป็นพิษต่อพืช และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมของต้นธูปฤๅษี (*Typha angustifolia* L.) ได้ด้วย

4.2.4 ประสิทธิภาพในการดูดซับ และสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ

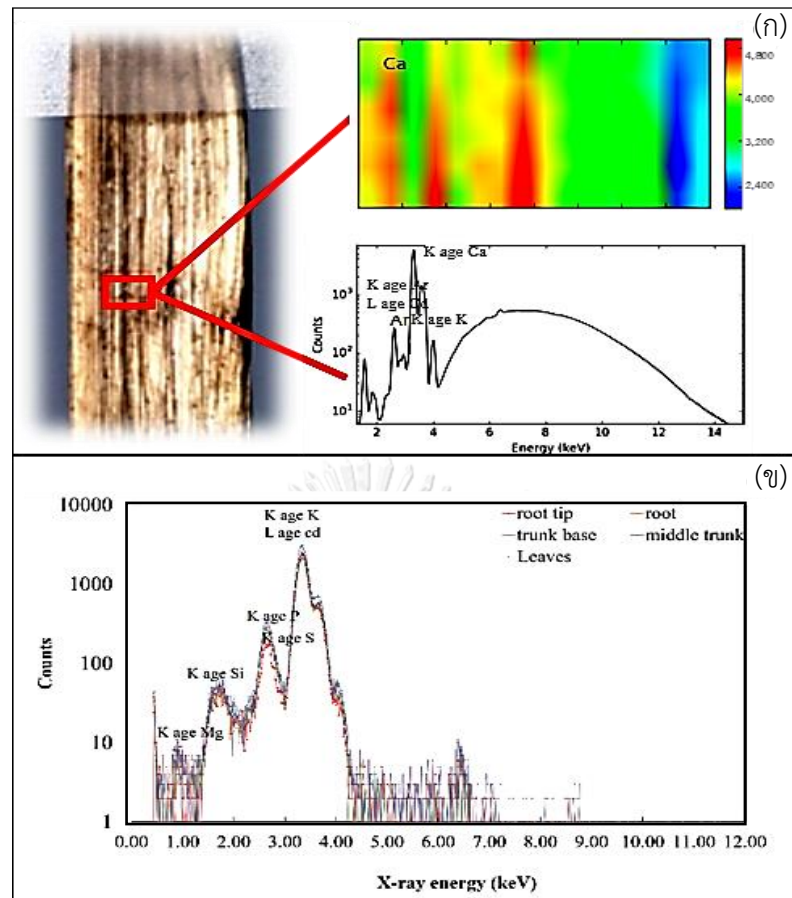
สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียด้วยหญ้าเนเปียร์แคระนั้น สามารถสรุปได้ว่า หญ้าเนเปียร์มีศักยภาพในการดูดซับและสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) และในน้ำเสีย ของชุดการทดลองควบคุมหรือชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 4.10(ก)) และชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล (รูปที่ 4.10(ข)) ผลการศึกษาทั้งสองชุดการทดลองพบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีประสิทธิภาพการดูดซับและสะสมแคดเมียมคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ (เปอร์เซ็นต์) ที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มสูงขึ้น ในขณะเดียวกันร้อยละของปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองชุดการทดลองควบคุมหรือชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมเพียงอย่างเดียวมีอัตราส่วนร้อยละของการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ ส่วนเหนือน้ำ และน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 23.71, 67.26 และ 7.77 ตามลำดับ หรือมีปริมาณการสะสมแคดเมียมเท่ากับ 32.28, 11.38 และ 3.73 มิลลิกรัม ตามลำดับ และชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอ มีอัตราส่วนร้อยละของการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ ส่วนเหนือน้ำ และน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 16.21, 83.53 และ 0.22 ตามลำดับ หรือมีปริมาณการสะสมแคดเมียมเท่ากับ 7.78, 40.09 และ 0.11 มิลลิกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาอัตราส่วนร้อยละของปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำและส่วนใต้น้ำของพืชทดลอง ในชุดที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอ ที่อัตราส่วน 1:2 โมล พบว่า อัตราส่วนร้อยละของปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ และส่วนใต้น้ำสูงกว่าชุดการทดลองควบคุมหรือชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมโดยไม่เติมเติมสารอีดีทีเอ โดยผลการศึกษาครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Lu et al. (2013) และ Liu et al. (2007) ที่พบว่า สารอีดีทีเอมีบทบาทสำคัญในการดูดซับโลหะหนักมาสะสมไว้บริเวณรากและ ลำต้น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราส่วนร้อยละของการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ และส่วนใต้น้ำของหญ้าเนเปียร์แคระที่เปลี่ยนไป พบว่า ชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอมีอัตราส่วนร้อยละของปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำและส่วนใต้น้ำสูงกว่าชุดการทดลองควบคุมหรือชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมโดยไม่เติมเติมสารอีดีทีเอ



รูปที่ 4.10 อัตราส่วนร้อยละของการสะสมแคตเมียมในส่วนตัวน้ำ (ราก) ส่วนหัวน้ำ (ลำต้น และใบ) และปริมาณแคตเมียมน้ำเสียสังเคราะห์ ก) ชุดการทดลองที่มีการเติมแคตเมียมหรือชุดการทดลองควบคุมและ ข) ชุดการทดลองที่มีการเติมแคตเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอ

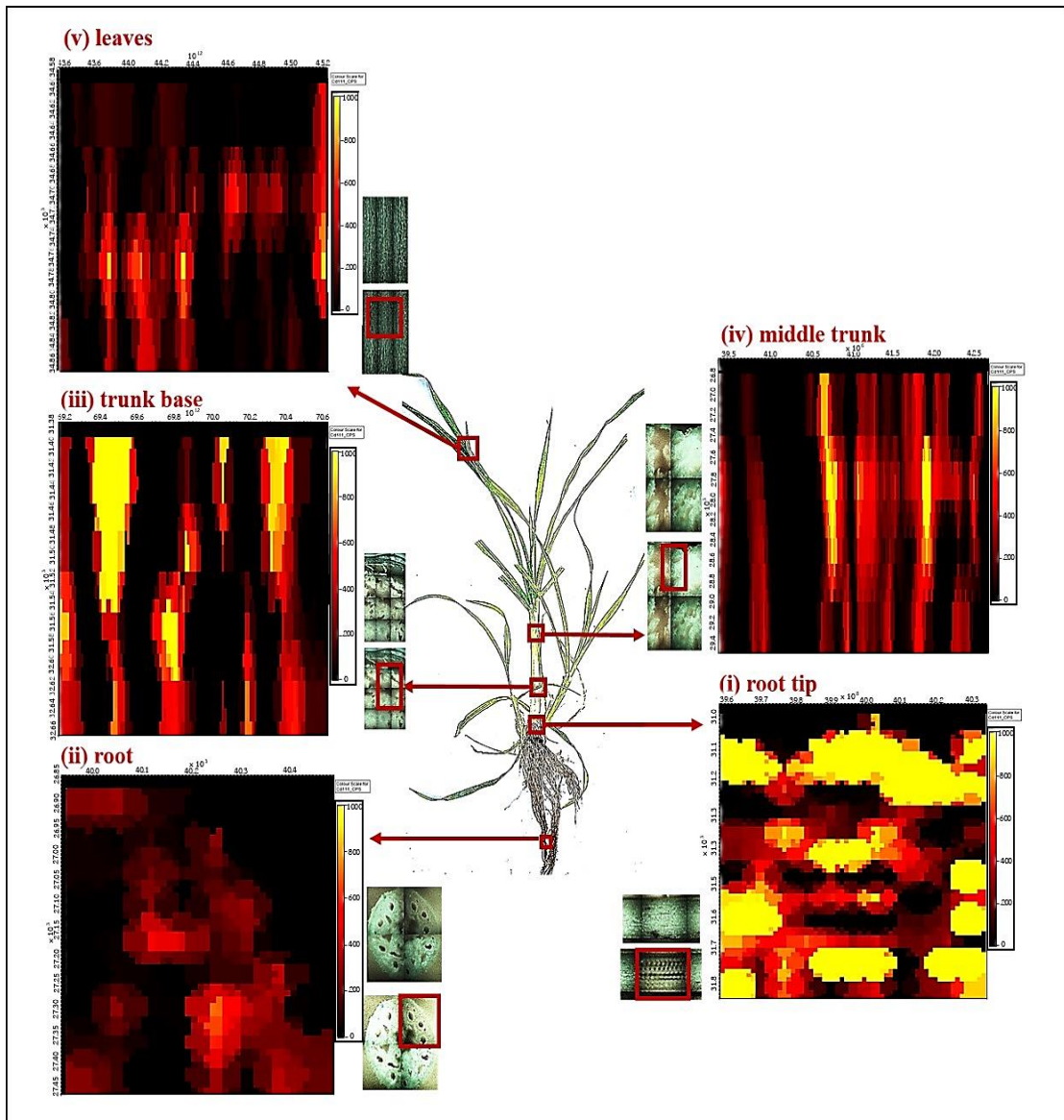
4.2.4 การกระจายตัวของแคดเมียมในพืช

การศึกษาในครั้งนี้ได้นำพืชตัวอย่างอีกส่วนหนึ่งมาทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่แข็ง และนำมาทำการวิเคราะห์ด้วยลำแสงซินโครตรอนด้วยเทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (synchrotron radiation x-ray fluorescence; SR-XRF) พาร์ทิเคิลอินดิวซ์เอกซ์เรย์อีมิชชัน (particle-induced x-ray emission; PIXE) และเลเซอร์ออบเลชันอินดักทีฟเปิดพลาสมาแมสสเปกโตรมิเตอร์ (LA-ICP-MS) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การสะสม และการกระจายตัวของสารแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ได้แก่ ส่วนปลายราก (root tip) ส่วนราก (root) ส่วนโคนลำต้น (trunk base) ส่วนกลางลำต้น (middle trunk) และส่วนใบ (leaves) จากการวิเคราะห์ตัวอย่างพืชด้วยลำแสงซินโครตรอนเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) พบว่า เทคนิคดังกล่าวมีขีดจำกัดในการศึกษา เนื่องจากพลังงานกระตุ้นอิเล็กตรอนไม่สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนในชั้น K ของแคดเมียมได้ และเมื่อนำตัวอย่างดังกล่าวมากระตุ้นอิเล็กตรอนในชั้น L ก็ยังพบว่า กราฟเกิดการซ้อนทับกับตำแหน่งกราฟของอาร์กอน ซึ่งพบมากในบรรยากาศ จึงทำให้ไม่ประสบความสำเร็จในการศึกษาด้วยเทคนิคหรือวิธีดังกล่าว หากแต่ในการวิเคราะห์พบธาตุชนิดอื่นที่มีระดับความเข้มข้นสูง เช่น แคลเซียม โพแทสเซียม และอื่นๆ เป็นต้น ดังรูปที่ 4.11(ก) ซึ่งผลการวิเคราะห์ในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Trebolazabala et al. (2017) ที่ทำการศึกษการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ในต้นมะเขือเทศ (*Solanum lycopersicum*) พบว่า การวิเคราะห์ด้วยวิธีการใช้ระบบลำแสงซินโครตรอนด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (SR-XRF) นั้น ไม่สามารถวิเคราะห์สารโลหะหนักที่ระดับความเข้มข้นต่ำได้ ดังนั้น จึงได้นำไปสู่การทดลองด้วยการใช้เทคนิคพาร์ทิเคิลอินดิวซ์เอกซ์เรย์อีมิชชัน (PIXE) ณ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (Thailand Center of Excellence in Physics) โดยได้นำตัวอย่างหญ้าเนเปียร์แคระ มาทำการวิเคราะห์เพื่ออธิบายลักษณะการกระจายตัวของสารแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ ผลการวิเคราะห์พบว่า การเรียงของรังสีเอกซ์ของแคดเมียมที่ระดับพลังงานชั้น L มีความใกล้เคียงกับธาตุโพแทสเซียม (potassium, K) ที่ระดับพลังงานชั้น K อีกทั้งตัวอย่างที่ใช้ศึกษาเป็นพืช จึงส่งผลให้มีธาตุโพแทสเซียมสูงกว่าค่าปริมาณแคดเมียมที่ต้องการศึกษา ดังรูปที่ 4.11(ข) ส่งผลให้ไม่ประสบความสำเร็จในการศึกษาการกระจายตัวของแคดเมียมด้วยเทคนิคดังกล่าวเช่นกัน จึงนำไปสู่การใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่มีความจำเพาะ คือ เครื่องเลเซอร์ออบเลชันอินดักทีฟเปิดพลาสมาแมสสเปกโตรมิเตอร์ (LA-ICP-MS) ที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งข้อมูลเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพ โดยได้ปฏิบัติการทดลอง ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ประเทศไทย



รูปที่ 4.11 การศึกษาการสะสมธาตุต่างๆ ในกล้วยเนเปียร์แคะโดย (ก) วิธีการใช้ระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนด้วยเทคนิค SR-XRF ส่วนของลำต้นพืช และ (ข) วิธีการใช้เทคนิคพาร์ทิเคิลอินดิฟิเคชันเอกซเรย์อิมมูชัน (PIXE)

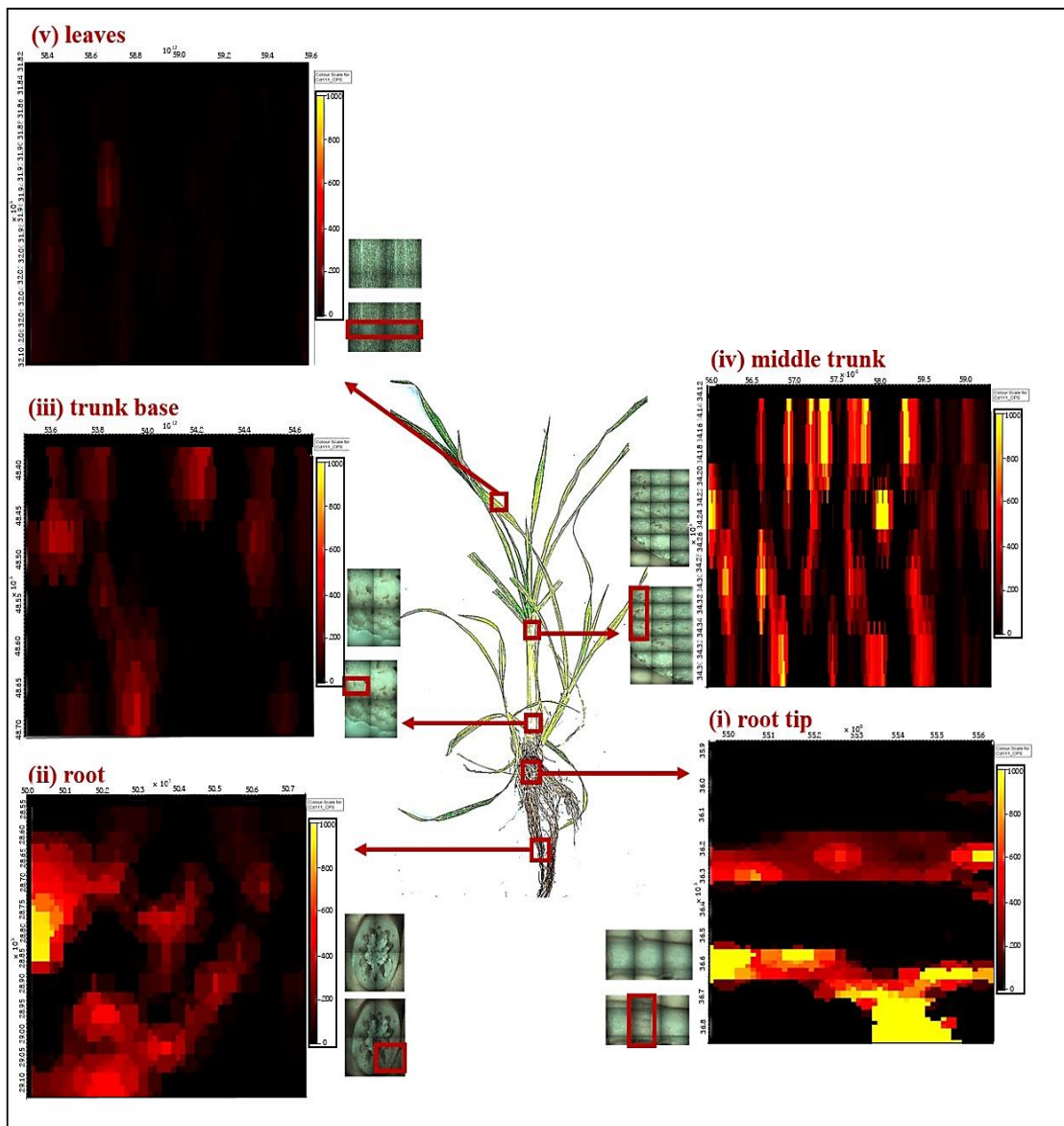
จากการวิเคราะห์การกระจายตัวด้วยเครื่องเลเซอร์อเบลชันอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมาแมสสเปกโตรมิเตอร์ (LA-ICP-MS) โดยได้ทำการศึกษาข้อมูลเชิงคุณภาพ โดยได้ทำการวิเคราะห์พืชทดลองหรือกล้วยเนเปียร์แคะที่ระยะเวลา 105 วันของการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากเป็นที่แน่ชัดว่าตัวอย่างพืชดังกล่าวมีการสะสมแคดเมียมในกล้วยเนเปียร์แคะบริเวณส่วนใต้น้ำ (ราก) สูงที่สุดรองลงมา คือ ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเลเซอร์อเบลชันอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมาแมสสเปกโตรมิเตอร์ (LA-ICP-MS) พบว่า แคดเมียมมีการสะสมบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอก และโดยรอบท่อลำเลียงน้ำและท่อลำเลียงอาหารของพืช ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การสะสมแคดเมียมในส่วนปลายราก โคนราก โคนลำต้น กลางลำต้น และใบของหญ้าเนเปียร์แคระ ชุดการทดลองที่มีการเติมสารอีดีทีเอร่วมกับแคดเมียม

ผลการวิเคราะห์ในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Jalil et al. (1994) ที่ได้ทำการศึกษากลไกการสะสมแคดเมียมในมะเขือเทศ ข้าวสาลี และข้าวโพด ซึ่งผลการทดลองทั้ง 3 การทดลองพบว่า เนื้อเยื่อบริเวณหน่อ และท่อลำเลียงน้ำบริเวณใบของพืชทั้งสามชนิดมีการตรวจพบสารแคดเมียมในปริมาณสูง เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองควบคุมหรือชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมอย่างเดียว และชุดที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล พบว่า ในชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมบริเวณเนื้อเยื่อชั้นใน รวมถึงบริเวณท่อลำเลียงอาหารสูงชันเนื่องมาจากคุณสมบัติของสารอีดีทีเอที่เข้าล้อมอะตอมกลางของแคดเมียม จึงทำให้เกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่ไม่มีประจุ ซึ่งแพร่ผ่านชั้นของลิกนิน และซูเบอร์ลินได้ง่ายขึ้น (Schreiber, 2010) ดังรูปที่ 4.12

สำหรับชุดการทดลองที่ไม่ได้เติมสารฮีทีทีเอ พบว่า การเคลื่อนที่ของสารแคดเมียมเข้าสู่เนื้อเยื่อชั้นในจะเป็นไปได้ยากขึ้น เนื่องจากลิกนิน และซูเบอร์ลิน เป็นกลุ่มสารที่มีขั้วอยู่ระหว่างเนื้อเยื่อชั้นนอกและเนื้อเยื่อชั้นใน (Abdel-Salam, 2012; Song et al., 2016) จึงพบการกระจายตัวของแคดเมียมบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอก และชั้นคอร์เทกซ์ได้อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 การสะสมแคดเมียมในส่วนปลายราก โคนราก โคนลำต้น กลางลำต้น และใบของหญ้าเนเปียร์แคระ ชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียม

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเลเซอร์อเบลชันอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมาแมสสเปกโตรมิเตอร์ (LA-ICP-MS) ได้นำไปสู่การวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอน เทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ ณ Taiwan photon source (TPS) ที่ beam line 23A x-ray nanoprobe ประเทศไต้หวัน ซึ่งมีพลังงานกระตุ้น 4-15 keV เป็นการศึกษาการเรียงของรังสีเอกซ์ของอิเล็กตรอนในชั้น L โดยได้นำตัวอย่างพืชที่ 105 วัน

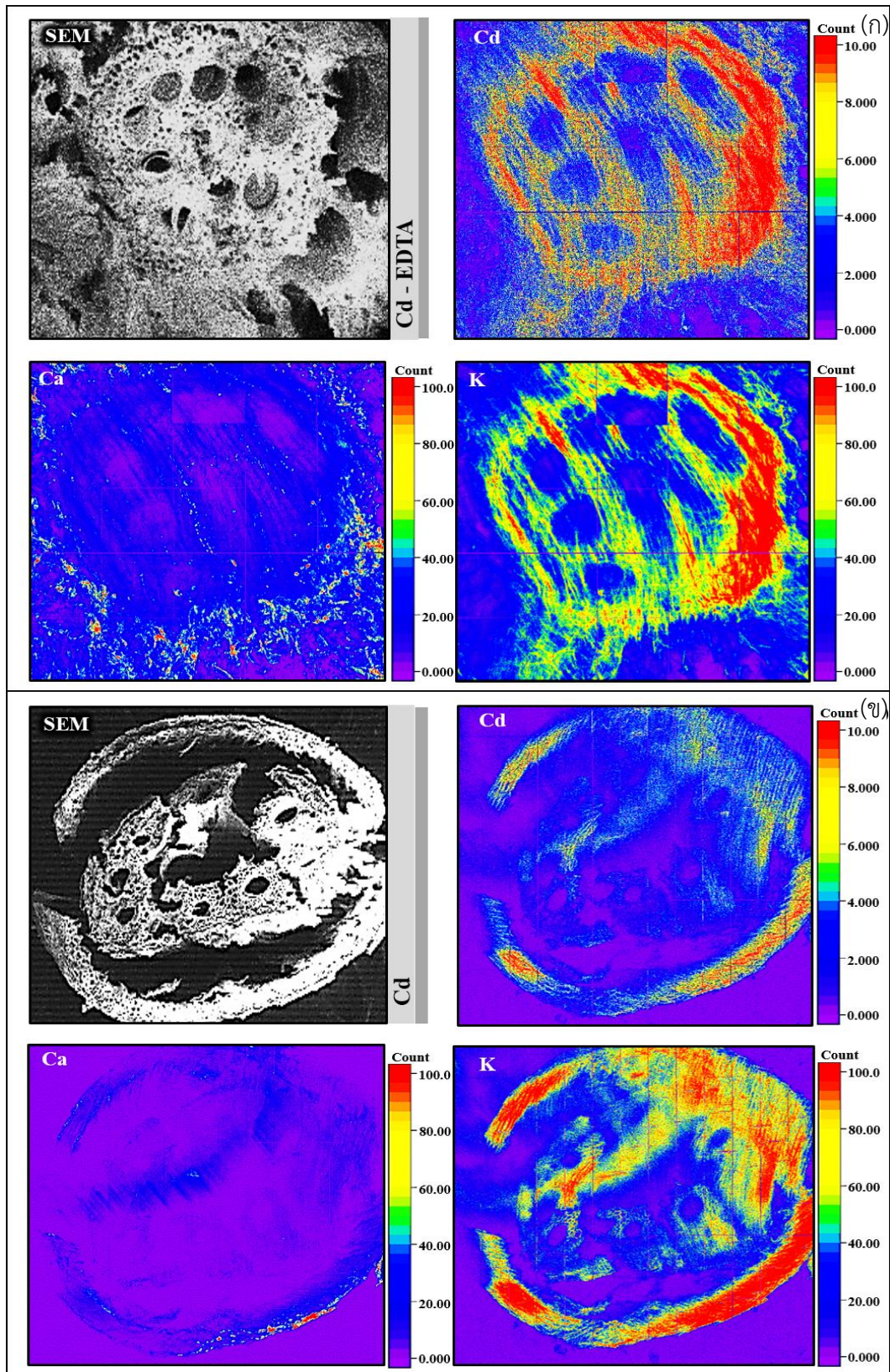
ของการทดลอง มาทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่แข็ง และนำมาวิเคราะห์ด้วยลำแสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (micro-XRF) เพื่อวิเคราะห์และพิจารณาผลของสารอิตีทีเอ ต่อลักษณะการกระจายตัวของแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ซึ่งได้แบ่งพืชออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (micro-XRF) ที่ Taiwan Photon Source (TPS), beam line 23A X-ray Nano probe ซึ่งมีพลังงานกระตุ้น 4-15 keV และเป็นการศึกษาการเรียงของรังสีเอกซ์ของอิเล็กตรอนในชั้น L ของแคดเมียม พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีการสะสมแคดเมียมที่บริเวณรากสูงกว่าส่วนอื่นๆ และยังพบว่า ปลายราก และโคนราก มีการสะสมแคดเมียมอยู่มากในชั้นคอร์เทกซ์ (Cortex) ดังรูปที่ 4.14(ก) และ 4.14(ข) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Mongkhonsin et al. (2016) ที่ทำการศึกษากการกระจายตัวของสังกะสี และแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของพืชด้วยลำแสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ และพบว่า ต้นว่านมหากาฬมีการส่งผ่านสังกะสี และแคดเมียมจากรากไปสู่ส่วนหัว และส่งผ่านตามท่อลำเลียงอาหารไปสะสมในส่วนของลำต้น และใบ โดยสังกะสี และแคดเมียมมีการสะสมมากบริเวณชั้นคอร์เทกซ์ (cortex)

อย่างไรก็ตามการทดลองในครั้งนี้เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอิตีทีเอ และชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมอย่างเดียว พบว่า บริเวณรากของพืชทดลองชุดที่เติมแคดเมียมร่วมกับสารอิตีทีเอมีการสะสมแคดเมียมได้สูงกว่า และมีการกระจายตัวของแคดเมียมในบริเวณเนื้อเยื่อชั้นในสูงกว่าในชุดที่ไม่มีการเติมสารอิตีทีเอ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Schreiber (2010) ที่พบว่า สารอิตีทีเอที่เข้าไปล้อมแคดเมียมไอออนจะทำให้ห่อหุ้มของแคดเมียมไอออนเคลื่อนที่ผ่านชั้นลิกนิน และซูเบอร์ลินของพืชทดลองได้ดีขึ้น

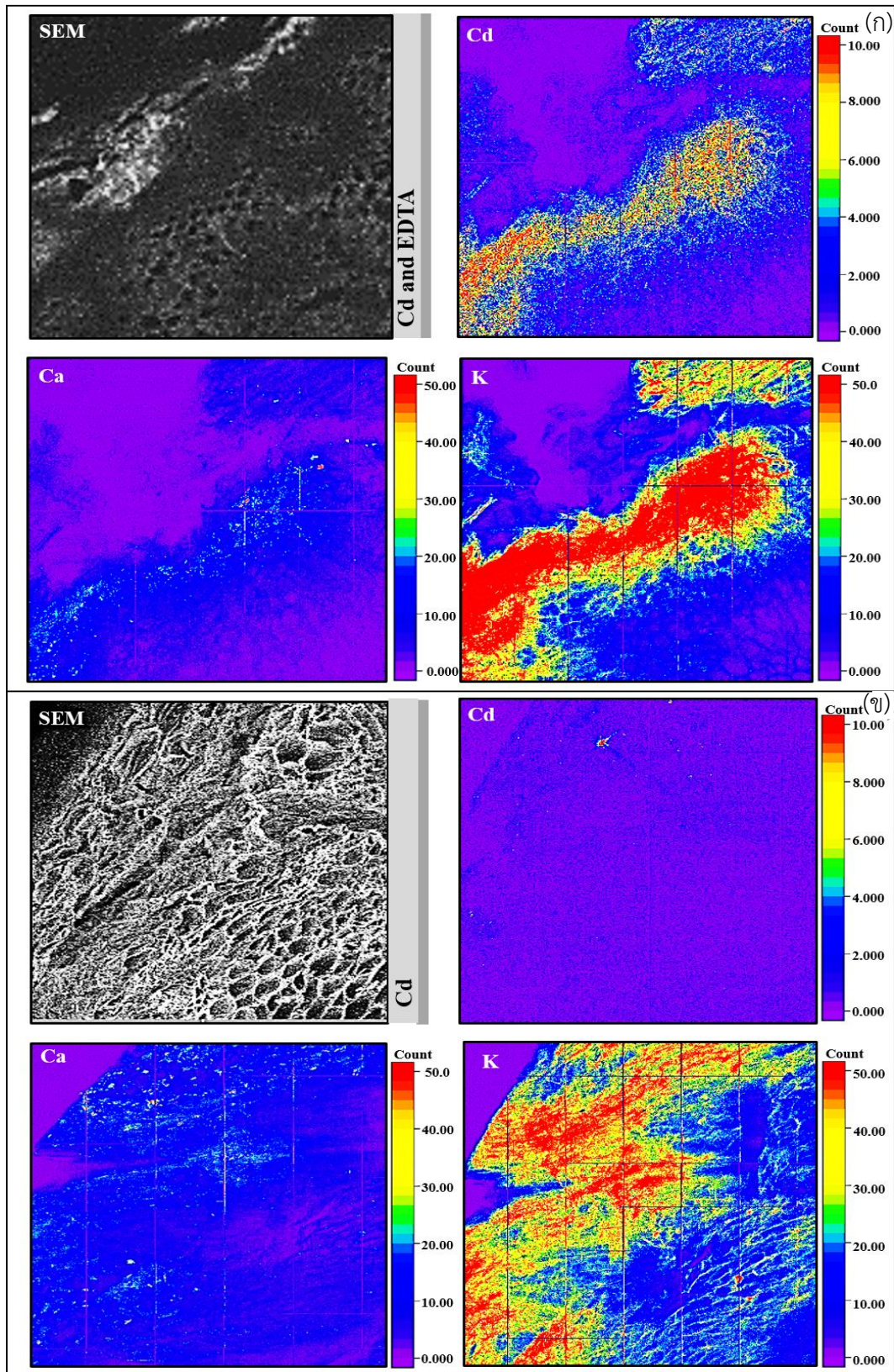
สำหรับการสะสมและกระจายตัวของแคดเมียมในส่วนของลำต้นของพืช พบว่า มีการสะสมของแคดเมียมสูงในบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอก และบริเวณท่อลำเลียงอาหาร (ดังรูปที่ 4.15(ก) และ 4.15(ข)) ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Fukuda et al. (2008) ที่ทำการศึกษากการกระจายตัวของแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของ *Arabidopsis halleri* (L.) ที่สะสมในพืช จากการศึกษาดังกล่าวพบการสะสมแคดเมียมบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอก และท่อลำเลียงอาหารของพืชทดลองได้อย่างชัดเจนกว่าบริเวณอื่นๆ นอกจากนี้ในการศึกษาค้างนี้เมื่อทำการพิจารณาการสะสมแคดเมียมบริเวณใบ พบว่า แคดเมียม มีการกระจายตัวในบริเวณเส้นกลางใบ (midrib หรือ midvein) และเส้นใบย่อย (vein) หรือเรียกโดยรวมว่า vascular bundle หรือท่อลำเลียงน้ำและอาหาร (ดังรูปที่ 4.16(ก), และ 4.16(ข)) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Yang et al. (1996), Jalil et al. (1994) และ Jarvis et al. (1976) ที่ศึกษาการสะสมแคดเมียมในต้นมะเขือเทศ ข้าวสาลี และข้าวโพด ซึ่งผลการทดลองทั้ง 3 การทดลอง พบว่า มีการสะสมแคดเมียมบริเวณเนื้อเยื่อท่อลำเลียงน้ำและอาหารบริเวณใบของพืชทั้งสามชนิด อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในครั้งนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชุดการทดลองควบคุมหรือชุดการทดลองที่มีการเติมอิตีทีเอเพียงอย่างเดียว กับชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอิตีทีเอ พบว่า มีการสะสมและกระจายตัวของแคดเมียมบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอกสูงกว่าเนื้อเยื่อชั้นในทั้ง

สองชุดการทดลอง ซึ่งชุดการทดลองที่เติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอ พบว่ามีการสะสมและกระจายตัวของแคดเมียมในพืชทดลองสูงกว่าในชุดควบคุมที่ไม่เติมสารอีดีทีเออย่างเห็นได้ชัดเจน

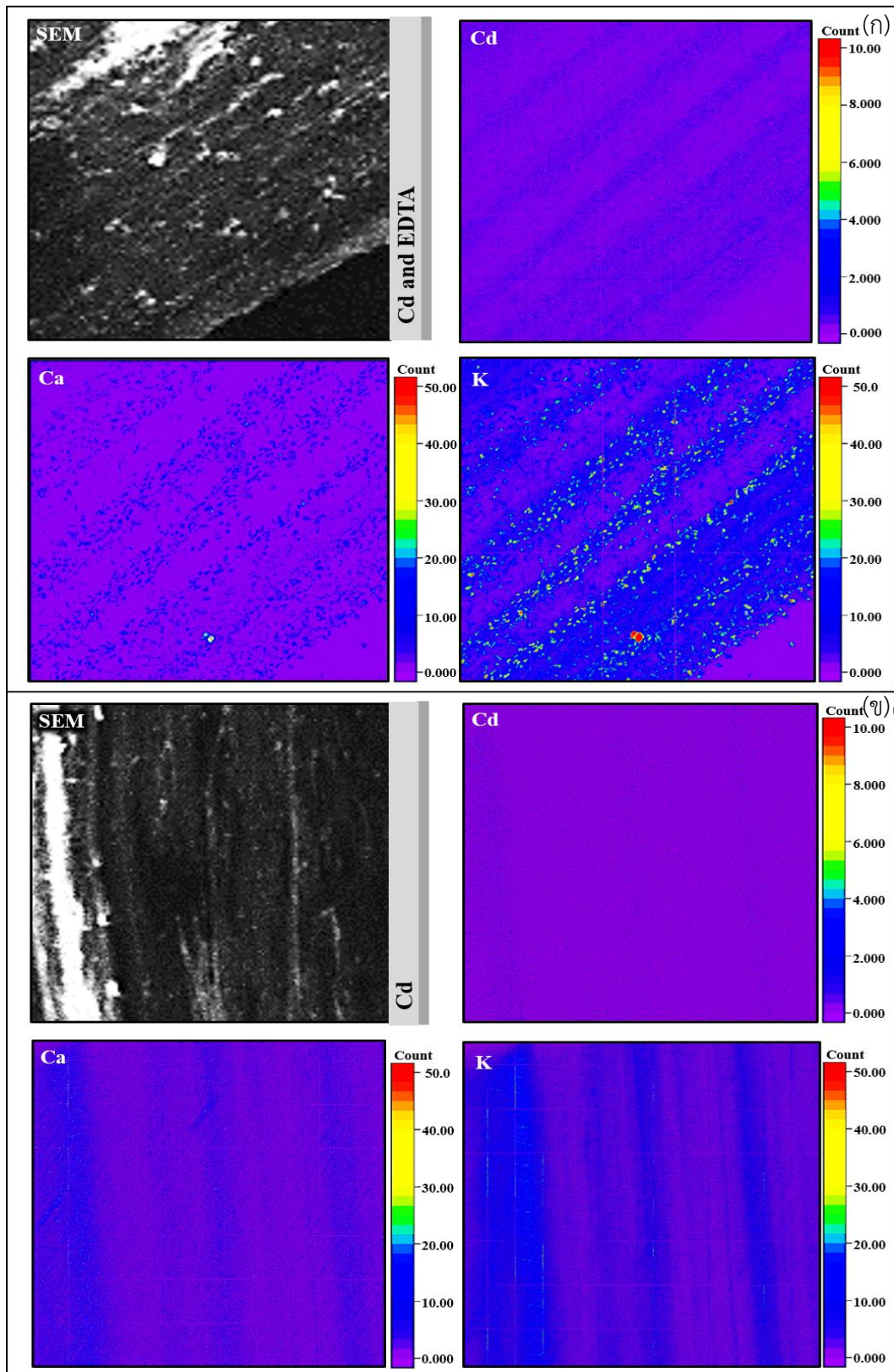
จากผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.14 ถึง 4.16 แสดงให้เห็นได้ว่า แผนภาพของพืชทดลองในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอีดีทีเอ มีการสะสมแคดเมียมบริเวณเนื้อเยื่อชั้นใน รวมถึงบริเวณท่อน้ำเลี้ยงอาหารสูงขึ้น อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของสารอีดีทีเอที่เข้าล้อมอะตอมกลางของแคดเมียมทำให้เกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่ไม่มีประจุ ซึ่งแพร่ผ่านชั้นของลิกนิน และซูเบอร์ลินได้ง่ายขึ้น (Song et al., 2016) สำหรับชุดการทดลองควบคุมหรือชุดการทดลองที่ไม่ได้เติมอีดีทีเอ พบว่า การเคลื่อนที่ของแคดเมียมจะเข้าสู่เนื้อเยื่อชั้นในนั้นเป็นไปได้ยากขึ้น เนื่องจากลิกนิน และซูเบอร์ลิน ซึ่งเป็นกลุ่มสารที่มีขั้วอยู่ระหว่างเนื้อเยื่อชั้นนอกและเนื้อเยื่อชั้นใน ทำให้พบการกระจายตัวของแคดเมียมบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอก และชั้นคอร์เทกซ์ได้ไม่ชัดเจนนัก (Abdel-Salam, 2012) นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อทำการศึกษาธาตุอาหารที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในพืช ได้แก่ แคลเซียม พบว่า มีแนวโน้มในการสะสมและกระจายตัวเพิ่มขึ้นในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอีดีทีเอ เนื่องมาจากแคลเซียมมีประจุบวกที่คล้ายกับแคดเมียม และมีลักษณะเป็นไอออนบวกที่มีประจุ 2^+ หรือไดวาเลนต์ (Kuzovkina et al., 2004; Parrotta et al., 2015) ทำให้เกิดการดูดดึงและสะสมในพืชลักษณะเดียวกัน ดังนั้นหากมีการสะสมแคดเมียมในปริมาณที่สูงจะมีผลต่อกระบวนการดูดดึงธาตุอาหารของพืช (Gomes et al., 2012) ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาธาตุโพแทสเซียม (K) พบว่า การกระจายตัวของโพแทสเซียมในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอีดีทีเอมีปริมาณต่ำกว่าในชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอีดีทีเออย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะบริเวณราก (รูปที่ 4.14) ทั้งนี้เนื่องมาจากพืชทดลองมีการสะสมแคดเมียมเข้าไปในพืชในปริมาณมาก จึงทำให้เกิดความเสียหายกับเนื้อเยื่อพืช (membrane) ประกอบกับสัดส่วนของโลหะหนักขาดความสมดุล จึงเป็นผลให้ปริมาณโพแทสเซียมของชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสารอีดีทีเอมีปริมาณสูงกว่าชุดที่มีการเติมสารอีดีทีเอร่วมด้วย (Khairy et al., 2016; Prasad, 2008)



รูปที่ 4.14 การสะสมแคดเมียมในส่วนรากของหญ้าเนเปียร์แคระ
 (ก) ชุดการทดลองที่มีการเติมสารอีดีทีเอร่วมกับแคดเมียม (ข) ชุดการทดลองควบคุม



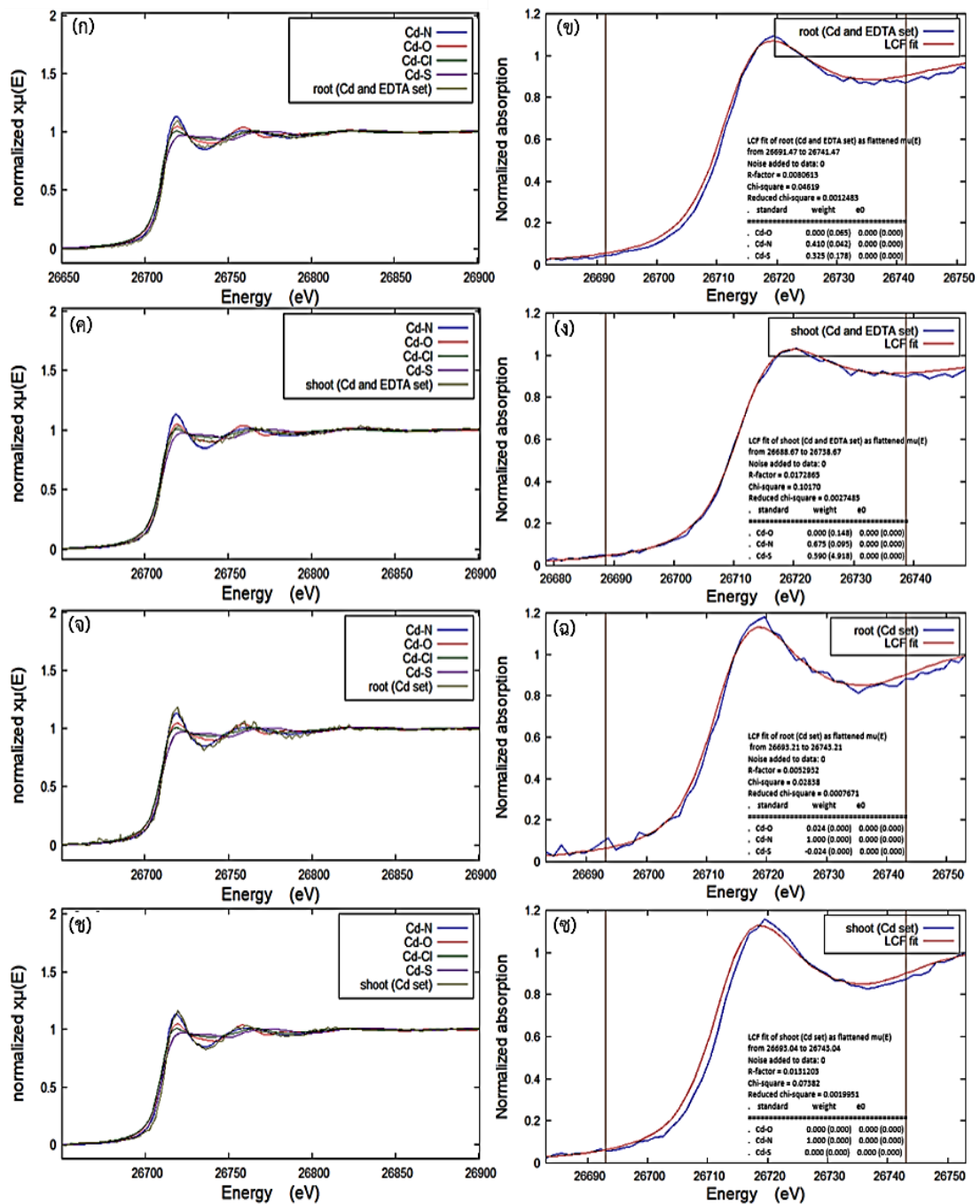
รูปที่ 4.15 การสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นของกล้วยเนเปียร์แคระ
(ก) ชุดการทดลองที่มีการเติมสารอีดีทีเอร่วมกับแคดเมียม (ข) ชุดการทดลองควบคุม



รูปที่ 4.16 การสะสมแคดเมียมในส่วนใบของหญ้าเนเปียร์แคระ
 (ก) ชุดการทดลองที่มีการเติมสารอีดีทีเฮอร์่วมกับแคดเมียม (ข) ชุดการทดลองควบคุม

4.2.5 รูปฟอร์มของแคดเมียมและสารอดีทีเอในหญ้าเนเปียร์แคระ

การศึกษารูปฟอร์มของแคดเมียมที่สะสมในพืชทดลองคือ หญ้าเนเปียร์แคระด้วยการใช้ลำแสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคเอกซเรย์แอบซอร์บชันสเปกโตรสโกปี (XAS) โดยนำตัวอย่างพืชทดลองที่ทำการแยกออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) และส่วนใต้น้ำ (ราก) มาทำการบดแยกส่วนและบดอัด จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค quick-scanning x-ray absorption spectroscopy ที่ Taiwan Photon Source (TPS), beam line 44A ประเทศไต้หวัน โดยทำ linear correlation fit เพื่อศึกษารูปฟอร์มของแคดเมียมที่สะสมในหญ้าเนเปียร์แคระที่เป็นไปได้ โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบกับสารที่อ้างอิง ผลการวิเคราะห์ชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอดีทีเอ พบว่า แคดเมียมมีการสะสมอยู่ในส่วนใต้น้ำของพืชในรูปของแคดเมียมไดวาเลนซ์เป็นส่วนใหญ่ ดังรูปที่ 4.17(ก) และ 4.17(ข) และเกิดพันธะอยู่กับออกซิเจน (Cd-O) และไนโตรเจน (Cd-N) ดังรูปที่ 4.17(จ) และ 4.17(ฉ) สำหรับชุดการทดลองควบคุมหรือชุดการทดลองที่เติมสารแคดเมียมเพียงอย่างเดียวพบว่า มีการสะสมของแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ และส่วนเหนือน้ำ โดยแคดเมียมอยู่ในรูปของแคดเมียมไดวาเลนซ์ ดังรูปที่ 4.17(ค) และ 4.17(ง) ที่เกิดพันธะอยู่กับไนโตรเจน (Cd-N) ดังรูปที่ 4.17(ซ) และ 4.17(ฅ) จากผลการศึกษาและวิเคราะห์ในครั้งนี้แสดงให้เห็นได้ว่า การเติมสารอดีทีเอ ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงออกซิเจนสถานะของแคดเมียม และแคดเมียมที่สะสมในพืชทดลองสามารถจับกับออกซิเจน และไนโตรเจนเป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องมาจากออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นธาตุหลักที่อยู่ในพืช อีกทั้งเป็นองค์ประกอบของสารแคดเมียมในเทรตที่ใช้เป็นสารละลายแคดเมียมในการทดลองครั้งนี้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Fukuda et al. (2008) ที่ทำการศึกษารูปฟอร์มแคดเมียมใน *Arabidopsis halleri* (L.) พบว่า แคดเมียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแคดเมียมไดวาเลนซ์ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Isaure et al. (2006) ที่ทำการศึกษารูปฟอร์มทางเคมีของแคดเมียมในตัวอย่างพืชโดยการใช้เทคนิค scanning electron microscope (SEM) พบว่า การกระจายตัวของแคดเมียมอยู่บริเวณขนใบในปริมาณสูงกว่าบริเวณอื่นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์รูปฟอร์มทางเคมีในการศึกษาครั้งนี้แล้ว พบว่า แคดเมียมสามารถเกิดพันธะอยู่กับอะตอมออกซิเจน (Cd-O) และอะตอมของไนโตรเจน (Cd-N) เป็นส่วนใหญ่ และยังพบแคดเมียมบางส่วนเกิดพันธะอยู่กับอะตอมซัลเฟอร์ (Cd-S) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Akhter et al. (2014) ที่ศึกษารูปทางเคมีของแคดเมียมบริเวณรากข้าวบาร์เลย์ และรากต้นหอม โดยพบว่า รูปทางเคมีของแคดเมียมบริเวณรากพืชทั้งสองชนิดสามารถจะเกิดพันธะอยู่กับอะตอมออกซิเจน (Cd-O) อะตอมของไนโตรเจน (Cd-N) และอะตอมซัลเฟอร์ (Cd-S)



รูปที่ 4.17 รูปฟอร์มของแคดเมียม 1) ชุดการทดลองที่เติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอ (ก) ส่วนต้นน้ำ (ราก) และ (ข) ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ, และ 2) ชุดการทดลองควบคุม (ค) ส่วนต้นน้ำ (ราก) และ (ง) ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของแคดเมียมกับสารมาตรฐาน 1) ชุดการทดลองที่เติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอ (จ) ส่วนต้นน้ำ (ราก) และ (ฉ) ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ, และ 2) ชุดการทดลองควบคุม (ช) ส่วนต้นน้ำ (ราก) และ (ซ) ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษามลของสารอีดีทีเอต่อกลไกการดูดซับแคดเมียมจากน้ำเสียโดยหญ้าเนเปียร์แคระ ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การศึกษาเบื้องต้นเพื่อศึกษาความทนทาน การแสดงความเป็นพิษ และการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระที่มีต่อสารละลายแคดเมียม สารละลายอีดีทีเอ และสารละลายผสมระหว่างแคดเมียมและอีดีทีเอ และ 2) การศึกษากลไกการสะสม การเคลื่อนที่ การกระจายตัว และรูปฟอร์มของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การศึกษาความทนทาน การแสดงความเป็นพิษ และการเจริญเติบโตสัมพัทธ์

การศึกษาความทนทาน การแสดงความเป็นพิษ และการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระที่ทำการปลูกใน 3 ชุดการทดลองคือ 1) ชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมที่ 6 ระดับความเข้มข้น ได้แก่ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 2) ชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายอีดีทีเอที่ 6 ระดับความเข้มข้น ได้แก่ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 3) ชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารละลายอีดีทีเอใน 3 อัตราส่วนโมล ได้แก่ 1:0.5, 1:1 และ 1:2 โมล จากการศึกษาพบว่า ชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระแปรผันตรงกับระดับความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมที่เติมกล่าวคือ ชุดการทดลองที่เติมสารละลายแคดเมียมระดับความเข้มข้นสูงจะมีปริมาณการสะสมแคดเมียมได้สูงด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พบการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระสูงที่สุด หากแต่เมื่อพิจารณาปริมาณมวลชีวภาพที่เพิ่มขึ้น และนำมาคำนวณในรูปแบบของสมมูลมวลสารเพื่อพิจารณาการสะสมแคดเมียมต่อต้นของหญ้าเนเปียร์แคระ เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมแคดเมียมสูงที่สุด โดยมีการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) และส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 11.99 ± 0.50 , และ 6.43 ± 0.10 มิลลิกรัม ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่า สารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระสูงสุด โดยพืชมีความสามารถเจริญเติบโตได้ดี กล่าวคือ หญ้าเนเปียร์แคระมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ การแสดงอาการความเป็นพิษต่ำ อีกทั้งหญ้าเนเปียร์แคระยังมีศักยภาพในการสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุด

การศึกษาความทนทาน การแสดงความเป็นพิษ การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์ แคระในชุดการทดลองที่มีการเติมสารอีดีทีเอที่ 6 ระดับความเข้มข้น ได้แก่ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาพบว่า ในทุกชุดการทดลองหญ้าเนเปียร์แคระมีค่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์สูงกว่าชุดการทดลองควบคุม และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษต่ำ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบแต่ละระดับความเข้มข้น พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังนั้นจากการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า หญ้าเนเปียร์แคระอาจมีความทนทานต่อระดับความเข้มข้นของอีดีทีเอมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้เมื่อนำระดับความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมที่หญ้าเนเปียร์แคระมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ มีการแสดงอาการความเป็นพิษต่ำ อีกทั้งหญ้าเนเปียร์แคระยังมีศักยภาพในการสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุดมาใช้เป็นค่าอ้างอิง และคำนวณอัตราส่วนโมลระหว่างแคดเมียมและสารอีดีทีเอ 1:0.5, 1:1 และ 1:2 โมล เพื่อศึกษาความทนทาน การแสดงความเป็นพิษ การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ ของหญ้าเนเปียร์แคระ โดยผลการศึกษาดังกล่าว พบว่า การเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอ ทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระลดลง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมแคดเมียม และมีส่วนช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่ของแคดเมียมทำให้มีการสะสมแคดเมียมบริเวณส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอที่อัตราส่วน 1:2 โมล ที่มีการสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุดเมื่อคำนวณปริมาณการสะสมแคดเมียมร่วมกับมวลชีวภาพ และมีค่าเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษต่ำที่สุด

5.1.2 กลไกการสะสม การเคลื่อนที่ การกระจายตัว และรูปฟอร์มของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ

การศึกษากลไกการสะสม การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ ได้ใช้ผลการทดลองในส่วนที่ 1 มาใช้เป็นค่าอ้างอิง กล่าวคือ เลือกรุ่นใช้ชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารอีดีทีเอที่อัตราส่วน 1:2 โมล โดยพบว่า ชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอ หญ้าเนเปียร์แคระมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) สูงกว่าชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการสะสมแคดเมียมที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ในวันที่ 105 ของการทดลอง หรือประมาณ 1 รอบของการเก็บเกี่ยว หญ้าเนเปียร์แคระมีการสะสมแคดเมียมได้ปริมาณสูงกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อต้น โดยสามารถกล่าวได้ว่า หญ้าเนเปียร์แคระอยู่ในกลุ่มพืชที่มีศักยภาพในการสะสมแคดเมียมในปริมาณสูง (cadmium-hyperaccumulator plant) ผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีความเหมาะสมในการใช้บำบัดฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียม และมีความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำปนเปื้อนแคดเมียมในสภาวะจริง

นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างหญ้าเนเปียร์แคะด้วยลำแสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ และเลเซอร์อเบลชันอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมาแมสสเปกโตรมิเตอร์ (LA-ICP-MS) ทำให้ทราบถึงลักษณะการกระจายตัวของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคะของชุดการทดลองควบคุม (ชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมเพียงอย่างเดียว) ที่มีการกระจายตัวของแคดเมียมบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอกเป็นหลัก ในขณะที่ชุดการทดลองที่มีการเติมแคดเมียมร่วมกับสารอีดีทีเอ พบว่า มีการกระจายตัวของแคดเมียมในเนื้อเยื่อชั้นในได้มากขึ้น ทำให้เกิดการลำเลียงไปสะสมยังส่วนลำต้น และใบเพิ่มมากขึ้น โดยมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเนื้อน้ำที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ด้วยลำแสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคเอกซเรย์แอบซอร์บชันสเปกโตรสโกปี (SR-XAS) ทำให้ทราบถึงสถานะออกซิเดชันและการเกิดพันธะระหว่างแคดเมียมกับอะตอมของธาตุอื่นๆ ที่อยู่โดยรอบอะตอมของแคดเมียม เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน เป็นต้น ทำให้สถานะออกซิเดชันของแคดเมียมไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเติมสารอีดีทีเอ

การใช้แสงซินโครตรอน ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (SR-XRF) และเทคนิคเอกซเรย์แอบซอร์บชันสเปกโตรสโกปี และเทคนิคเลเซอร์อเบลชันอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมาแมสสเปกโตรมิเตอร์ (LA-ICP-MS) นับว่ามีความสำคัญต่อการศึกษา ปรับปรุง และพัฒนาวิธีการบำบัดฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยผลจากการศึกษาที่ได้ในรูปของข้อมูลในเชิงปริมาณยังมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ได้ในรูปข้อมูลในเชิงปริมาณอีกด้วย โดยผลของการใช้เครื่องมือดังกล่าวมีส่วนสำคัญยิ่ง ที่สามารถทำให้เข้าใจบทบาทของสารอีดีทีเอที่ส่งผลและช่วยให้เกิดการสะสมและกระจายตัวของแคดเมียมในเนื้อเยื่อชั้นในได้มากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาในระยะเวลาการทดลองที่ยาวนานขึ้นเพื่อให้เห็นลักษณะการสะสมและกระจายตัวของแคดเมียมในพืชที่ชัดเจนขึ้น

5.2.2 ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างน้ำที่ปนเปื้อนจริงและน้ำปนเปื้อนจากห้องทดลอง เพื่อพิจารณาปัจจัยอื่นที่เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ธาตุอาหาร และสารอินทรีย์ เป็นต้น

5.2.3 ควรมีการศึกษาอัตราการเติมสารอีดีทีเอและระยะเวลาในการเติมสารอีดีทีเอเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ในดินปนเปื้อนเพื่อบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนจริง ทั้งนี้ควรมีการศึกษารูปแบบการประยุกต์ใช้ที่มีความเหมาะสมในพื้นที่อีกด้วย



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
สถานที่ดำเนินการทดลอง



รูปที่ ก1 (ก) บริเวณด้านหน้า (ข) บริเวณด้านข้าง และ (ค) ภายในโรงเรือนทดลอง บริเวณคาดฟ้า ชั้น 2 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



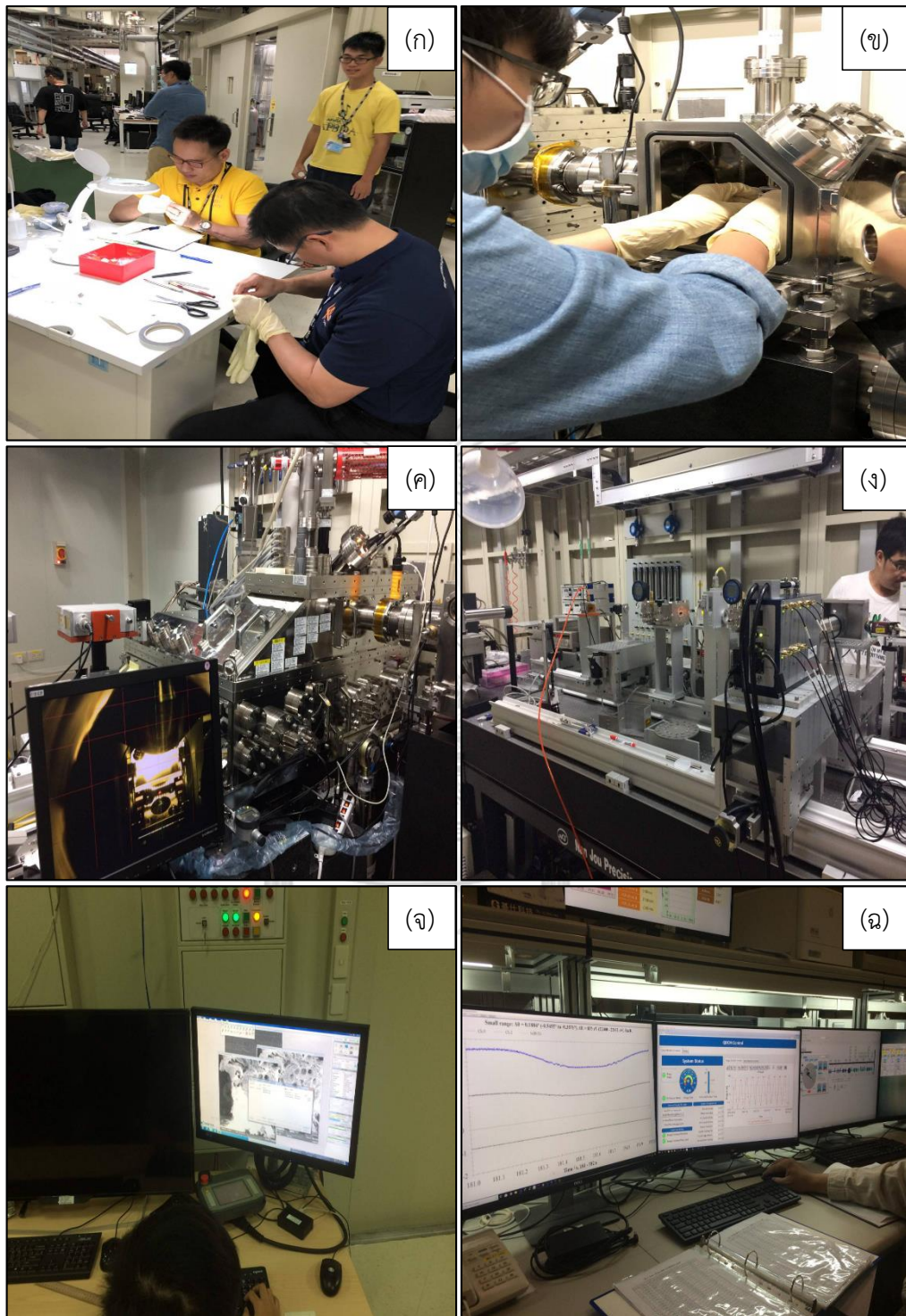
รูปที่ ก2 (ก) ห้องเตรียมสารเคมี (ข) ห้องปฏิบัติการสำหรับเตรียมตัวอย่างที่มีฤทธิ์กัดกร่อน และ (ค) ห้องชั่งสารและเตรียมตัวอย่าง ห้องปฏิบัติการ ชั้น 3 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



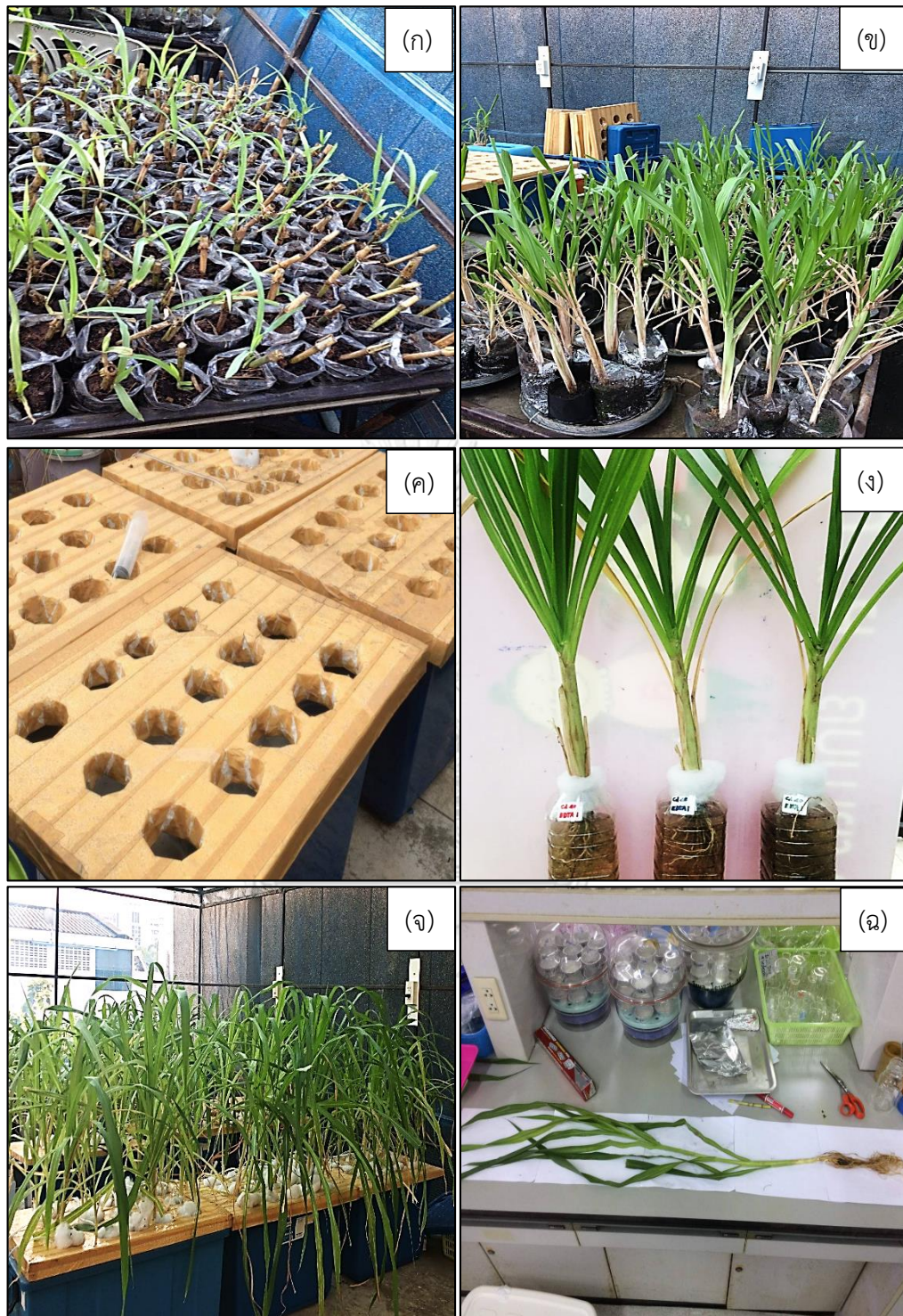
รูปที่ ก3 (ก) การผสมสารอ้างอิงด้วยเครื่องผสมตัวอย่าง (ข) เครื่องอัดเม็ดตัวอย่าง
(ค) กระบวนการอัดเม็ดตัวอย่างโดยเพิ่มเป็นลำดับขั้น (ง) การเตรียมตัวอย่างในห้องใส่ตัวอย่าง

(จ) และ (ฉ) การใส่ตัวอย่างและวิเคราะห์ตัวอย่าง

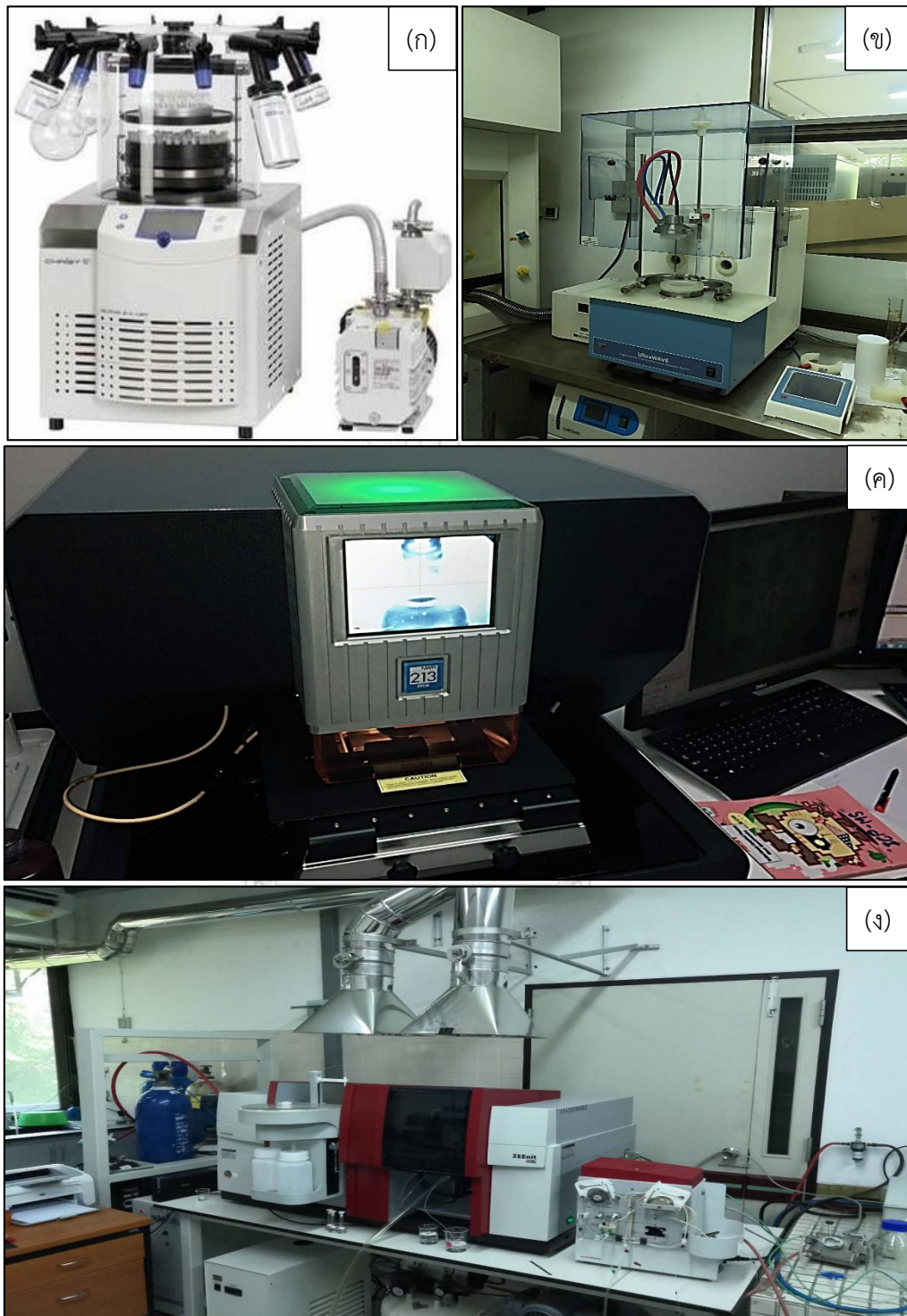
สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา



รูปที่ ก4 (ก) การเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ (ข) การนำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์เข้าเครื่อง (ค) สถานีวิจัยที่ 23A x-ray nanoprobe (ง) สถานีวิจัยที่ 44A A x-ray nanoprobe Quick-scanning X-ray Absorption Spectroscopy (จ) และ (ฉ) การควบคุมระหว่างเครื่องมือทำการวิเคราะห์ที่ National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC) ประเทศไต้หวัน



รูปที่ ก5 (ก) การปักชำท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ (ข) การคัดเลือกดูแลต้นพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ
 (ค) ภาชนะที่บ่งแสงเพื่อบรรจุกระถางทดลอง (ง) ลักษณะพืชทดลองที่ปลูกในกระถางทดลอง
 (จ) การทดลองที่มีการปลูกในภาชนะที่บ่งแสงโดยมีการเติมอากาศตลอดเวลา และ
 (ฉ) การเก็บตัวอย่าง และการสังเกตอาการความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ



รูปที่ ก6 (ก) เครื่องทำแห้งแบบแช่แข็ง (freeze dryer) (ข) เครื่องไมโครเวฟไดเจสชัน
 (ค) เครื่องเลเซอร์อะบเลชันอินดักทีฟลิคอบเพิลพลาสมาอาร์แมสสเปกโตรเมทรี (LA-ICP-MS)
 และ (ง) เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS)

ภาคผนวก ข

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

1) การศึกษาเบื้องต้นเพื่อศึกษาความทนทาน การแสดงความเป็นพิษ และการเจริญเติบโตสัมพันธ์ของหญ้าเนเปียร์แคะที่มีต่อแคดเมียม อีดีทีเอ และแคดเมียม-อีดีทีเอ

ตารางที่ ข1 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมแคดเมียมระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 0
Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
แคดเมียม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.72	
แคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.69	
แคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.69	
แคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.66	
แคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.60	6.60
แคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		6.59

ตารางที่ ข2 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมแคดเมียมระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 15
Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
แคดเมียม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.90
แคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.98
แคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.72
แคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.72
แคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.66
แคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.61

ตารางที่ ข3 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมแคลเซียมระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 30
Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
แคลเซียม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	7.23				
แคลเซียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		7.09			
แคลเซียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3			6.96		
แคลเซียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3				6.84	
แคลเซียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3					6.65
แคลเซียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3					6.63

ตารางที่ ข4 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมแคลเซียมระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 45
Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
แคลเซียม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	7.69			
แคลเซียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		7.25		
แคลเซียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		7.24		
แคลเซียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3			7.01	
แคลเซียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3			6.69	
แคลเซียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3				6.63

ตารางที่ ข5 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมแคลเซียมระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 0
Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
แคลเซียม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	264.12		
แคลเซียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		1701.04	
แคลเซียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		1704.03	
แคลเซียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		1759.42	
แคลเซียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3			1866.60
แคลเซียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3			1869.59

ตารางที่ ข6 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมแคดเมียมระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 15

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
แคดเมียม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	260.10			
แคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		1693.78		
แคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		1685.72		
แคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		1656.72		
แคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3			1789.66	
แคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3				1896.61

ตารางที่ ข7 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมแคดเมียมระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
แคดเมียม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	256.12			
แคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		1548.14		
แคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		1521.96		
แคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		1547.88		
แคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3			1678.54	
แคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3				1786.64

ตารางที่ ข8 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมแคดเมียมระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 45

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
แคดเมียม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	237.69		
แคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		1483.25	
แคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		1479.12	
แคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		1498.01	
แคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3			1669.23
แคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3			1703.61

ตารางที่ ข9 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมแคดเมียมระดับความเข้มข้นต่างๆ
วันที่ 0

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
แคดเมียม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	253.42
แคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	275.89
แคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	284.38
แคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	279.45
แคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	266.79
แคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	289.03

ตารางที่ ข10 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมแคดเมียมระดับความเข้มข้นต่างๆ
วันที่ 15

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
แคดเมียม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	264.10
แคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	274.31
แคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	286.23
แคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	279.55
แคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	284.23
แคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	283.14

ตารางที่ ข11 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมแคดเมียมระดับความเข้มข้นต่างๆ
วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
แคดเมียม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	286.15
แคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	275.34
แคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	268.70
แคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	275.63
แคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	261.37
แคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	286.42

ตารางที่ ข12 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมแคดเมียมระดับความเข้มข้นต่างๆ
วันที่ 45

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
แคดเมียม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	237.69
แคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	267.62
แคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	269.01
แคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	273.45
แคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	269.23
แคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	270.47

ตารางที่ ข13 การดูตึงและสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของพืชที่มีการเติมแคดเมียม
ระดับความเข้มข้นต่างๆ

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
แคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 45 วัน	3	1374.35				
แคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร 45 วัน	3	1369.38				
แคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร 45 วัน	3		883.08			
แคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร 45 วัน	3		890.32			
แคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร 45 วัน	3		779.05			
แคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร 30 วัน	3		662.96			
แคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร 30 วัน	3			588.63	588.63	
แคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร 30 วัน	3			553.68	553.68	
แคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 30 วัน	3				533.96	
แคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร 30 วัน	3				539.23	
แคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 15 วัน	3					53.12
แคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร 15 วัน	3					50.28
แคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร 15 วัน	3					43.64
แคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร 15 วัน	3					25.12
แคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร 15 วัน	3					25.14

ตารางที่ ข14 การดูตึงและสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือหน้า (ลำต้น และใบ) ของพืชที่มีการเติมแคดเมียมระดับความเข้มข้นต่างๆ

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
แคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 45 วัน	3	1499.06		
แคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร 45 วัน	3	1387.39		
แคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร 45 วัน	3		911.74	
แคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร 45 วัน	3		829.98	
แคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร 45 วัน	3		683.85	
แคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร 30 วัน	3			288.64
แคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 30 วัน	3			271.03
แคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร 30 วัน	3			288.23
แคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร 30 วัน	3			323.45
แคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร 30 วัน	3			254.97
แคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 15 วัน	3			243.89
แคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร 15 วัน	3			234.35
แคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตร 15 วัน	3			230.12
แคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร 15 วัน	3			207.69
แคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร 15 วัน	3			193.78

ตารางที่ ข15 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 0

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
สารอีดีทีเอ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.72	
สารอีดีทีเอ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.78	
สารอีดีทีเอ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.78	
สารอีดีทีเอ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		7.01
สารอีดีทีเอ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		6.95
สารอีดีทีเอ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		7.04

ตารางที่ ข16 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 15
Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
สารอีดีทีเอ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.90
สารอีดีทีเอ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.71
สารอีดีทีเอ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.72
สารอีดีทีเอ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.96
สารอีดีทีเอ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	6.74
สารอีดีทีเอ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	7.02

ตารางที่ ข17 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 30
Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
สารอีดีทีเอ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	7.23		
สารอีดีทีเอ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		6.69	
สารอีดีทีเอ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		6.69	
สารอีดีทีเอ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3			6.88
สารอีดีทีเอ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3			6.98
สารอีดีทีเอ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3			6.96

ตารางที่ ข18 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 45
Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
สารอีดีทีเอ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	7.69				
สารอีดีทีเอ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		6.69			
สารอีดีทีเอ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3			6.88		
สารอีดีทีเอ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3				7.02	
สารอีดีทีเอ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3				7.04	
สารอีดีทีเอ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3					6.93

ตารางที่ ข19 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 0

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
สารอีดีทีเอ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	264.12		
สารอีดีทีเอ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		664.18	
สารอีดีทีเอ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		682.10	
สารอีดีทีเอ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		683.21	
สารอีดีทีเอ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		681.95	
สารอีดีทีเอ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3			689.79

ตารางที่ ข20 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 15

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
สารอีดีทีเอ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	260.10		
สารอีดีทีเอ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		565.51	
สารอีดีทีเอ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		576.02	
สารอีดีทีเอ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		586.06	
สารอีดีทีเอ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		599.27	
สารอีดีทีเอ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3			606.97

ตารางที่ ข21 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
สารอีดีทีเอ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	256.12	
สารอีดีทีเอ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		516.23
สารอีดีทีเอ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		588.24
สารอีดีทีเอ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		580.24
สารอีดีทีเอ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		589.63
สารอีดีทีเอ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		596.95

ตารางที่ ข22 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 45

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
สารอีดีทีเอ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	237.69	
สารอีดีทีเอ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		587.16
สารอีดีทีเอ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		586.91
สารอีดีทีเอ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		507.77
สารอีดีทีเอ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		492.62
สารอีดีทีเอ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3		469.93

ตารางที่ ข23 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 0

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
สารอีดีทีเอ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	253.42
สารอีดีทีเอ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	258.81
สารอีดีทีเอ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	255.72
สารอีดีทีเอ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	252.84
สารอีดีทีเอ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	248.76
สารอีดีทีเอ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	245.76

ตารางที่ ข24 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 15

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
สารอีดีทีเอ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	260.10
สารอีดีทีเอ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	264.21
สารอีดีทีเอ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	257.48
สารอีดีทีเอ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	254.63
สารอีดีทีเอ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	249.45
สารอีดีทีเอ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	246.17

ตารางที่ ข25 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
สารอีดีทีเอ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	286.15
สารอีดีทีเอ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	276.56
สารอีดีทีเอ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	257.89
สารอีดีทีเอ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	258.29
สารอีดีทีเอ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	255.26
สารอีดีทีเอ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	246.97

ตารางที่ ข26 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมสารอีดีทีเอระดับความเข้มข้นต่างๆ วันที่ 45

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
สารอีดีทีเอ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	237.69
สารอีดีทีเอ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	278.95
สารอีดีทีเอ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	269.72
สารอีดีทีเอ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	259.07
สารอีดีทีเอ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	257.63
สารอีดีทีเอ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร	3	252.41

ตารางที่ ข27 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารละลายอีดีทีเอในอัตราส่วนโมลต่างๆ วันที่ 0

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
1:0.5 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	6.42
1:1 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	6.48
1:2 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	6.55

ตารางที่ ข28 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารละลาย
อีดีทีเอในอัตราส่วนโมลต่างๆ วันที่ 15

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
1:0.5 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	6.35	6.25
1:1 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3		
1:2 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	6.42	

ตารางที่ ข29 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารละลาย
อีดีทีเอในอัตราส่วนโมลต่างๆ วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	
1:0.5 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	6.32	
1:1 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	6.35	
1:2 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	6.38	

ตารางที่ ข30 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารละลาย
อีดีทีเอในอัตราส่วนโมลต่างๆ วันที่ 45

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
1:0.5 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	6.49	6.69	6.88
1:1 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3			
1:2 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3			

ตารางที่ ข31 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารละลายอีดีทีเอ ในอัตราส่วนโมลต่างๆ วันที่ 0

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
1:0.5 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	683.74	
1:1 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	694.13	
1:2 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	625.73	

ตารางที่ ข32 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารละลายอีดีทีเอ ในอัตราส่วนโมลต่างๆ วันที่ 15

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
1:0.5 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	681.49	
1:1 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	684.23	
1:2 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3		619.43

ตารางที่ ข33 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารละลายอีดีทีเอ ในอัตราส่วนโมลต่างๆ วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
1:0.5 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	677.59	
1:1 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	682.35	
1:2 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3		608.08

ตารางที่ ข34 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารละลายอีดีทีเอ ในอัตราส่วนโมลต่างๆ วันที่ 45

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
1:0.5 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	672.76	605.74
1:1 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	680.98	
1:2 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3		

ตารางที่ ข35 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมสารละลายแคดเมียม ร่วมกับสารละลายอีดีทีเอในอัตราส่วนโมลต่างๆ วันที่ 0

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	
1:0.5 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	262.74	
1:1 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	263.15	
1:2 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	285.32	

ตารางที่ ข36 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมสารละลายแคดเมียม ร่วมกับสารละลายอีดีทีเอในอัตราส่วนโมลต่างๆ วันที่ 15

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
1:0.5 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	281.49	289.78
1:1 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	281.93	
1:2 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3		

ตารางที่ ข37 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมสารละลายแคดเมียม ร่วมกับสารละลายอีดีทีเอในอัตราส่วนโมลต่างๆ วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
1:0.5 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	286.14	285.62
1:1 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	284.23	
1:2 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3		

ตารางที่ ข38 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารละลายอีดีทีเอในอัตราส่วนโมลต่างๆ วันที่ 45

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
1:0.5 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	289.04
1:1 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	288.13
1:2 โมลแคดเมียม : โมลอีดีทีเอ	3	289.98

ตารางที่ ข39 การดูดตั้งและสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของพืชที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารละลายอีดีทีเอในอัตราส่วนโมลต่างๆ

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 30 วัน	3	1076.14			
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 45 วัน	3	1022.22			
1:1 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 45 วัน	3		948.24		
ชุดควบคุม 45 วัน	3			889.96	
1:1 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 30 วัน	3			824.13	
1:0.5 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 45 วัน	3			748.47	
1:0.5 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 30 วัน	3			661.78	
ชุดควบคุม 30 วัน	3			589.24	
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 15 วัน	3				50.23
1:1 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 15 วัน	3				32.54
1:0.5 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 15 วัน	3				27.81
ชุดควบคุม 15 วัน	3				24.82

ตารางที่ ข40 การดูตั้งและสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือหน้า (ลำต้น และใบ) ของพืชที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมร่วมกับสารละลายอีดีทีเอในอัตราส่วนโมลต่างๆ

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 45 วัน	3	1273.31			
1:1 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 45 วัน	3		1068.91		
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 30 วัน	3		958.42		
1:0.5 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 45 วัน	3		915.90		
ชุดควบคุม 45 วัน	3		830.64		
1:1 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 30 วัน	3			725.89	
1:0.5 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 30 วัน	3			528.67	
ชุดควบคุม 30 วัน	3				323.44
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 15 วัน	3				267.08
1:1 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 15 วัน	3				253.70
1:0.5 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 15 วัน	3				232.31
ชุดควบคุม 15 วัน	3				207.89

2) ศักยภาพของสารอีดีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในพืช

ตารางที่ ข41 การดูตั้งและสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือหน้า (ลำต้น และใบ) ของพืชทดลอง

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 105 วัน	3	333.59						
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 97 วัน	3		234.01					
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 90 วัน	3			165.78				
ชุดควบคุม 105 วัน	3				97.42			
ชุดควบคุม 97 วัน	3				99.13			
ชุดควบคุม 90 วัน	3				97.34			
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 82 วัน	3				118.43			
ชุดควบคุม 82 วัน	3				94.10			
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 75 วัน	3				108.65			
ชุดควบคุม 75 วัน	3				73.95			
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 67 วัน	3				96.04			

ตารางที่ ข41 (ต่อ) การดูที่ตั้งและสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของพืชทดลอง
Duncan^a

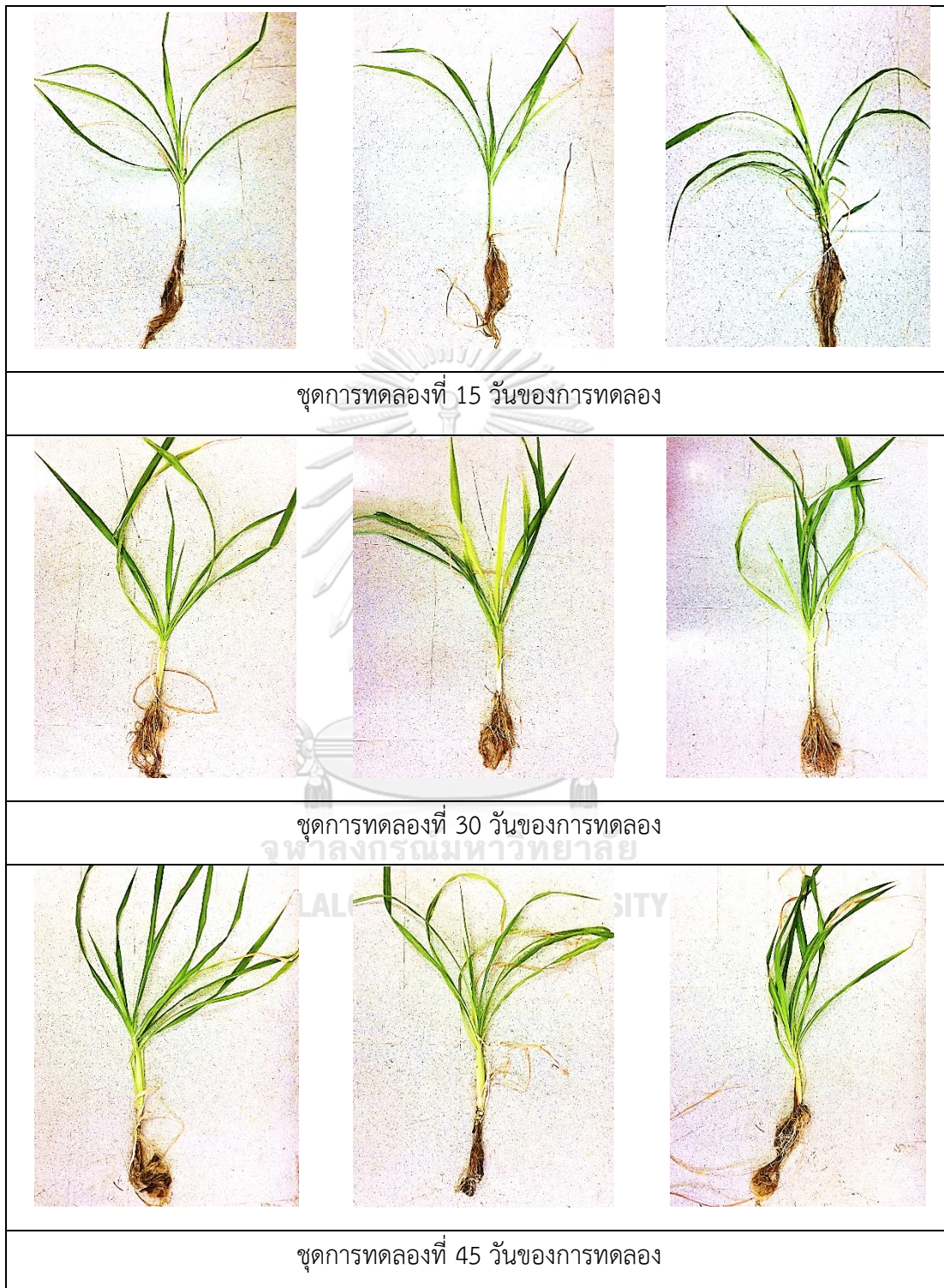
ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
ชุดควบคุม 67 วัน	3				68.86			
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 60 วัน	3				86.79			
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 52 วัน	3				84.54			
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 45 วัน	3				80.39			
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 37 วัน	3				80.90			
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 30 วัน	3				71.13			
ชุดควบคุม 60 วัน	3					44.97		
ชุดควบคุม 52 วัน	3					43.81		
ชุดควบคุม 45 วัน	3					31.27		
ชุดควบคุม 37 วัน	3					30.97		
ชุดควบคุม 30 วัน	3					31.40		
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 22 วัน	3					30.90		
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 15 วัน	3					29.64		
ชุดควบคุม 22 วัน	3						16.61	
ชุดควบคุม 15 วัน	3						17.48	
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 7 วัน	3							3.10
ชุดควบคุม 7 วัน	3							1.01

ตารางที่ ข42 การดูที่ตั้งและสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของพืชทดลอง

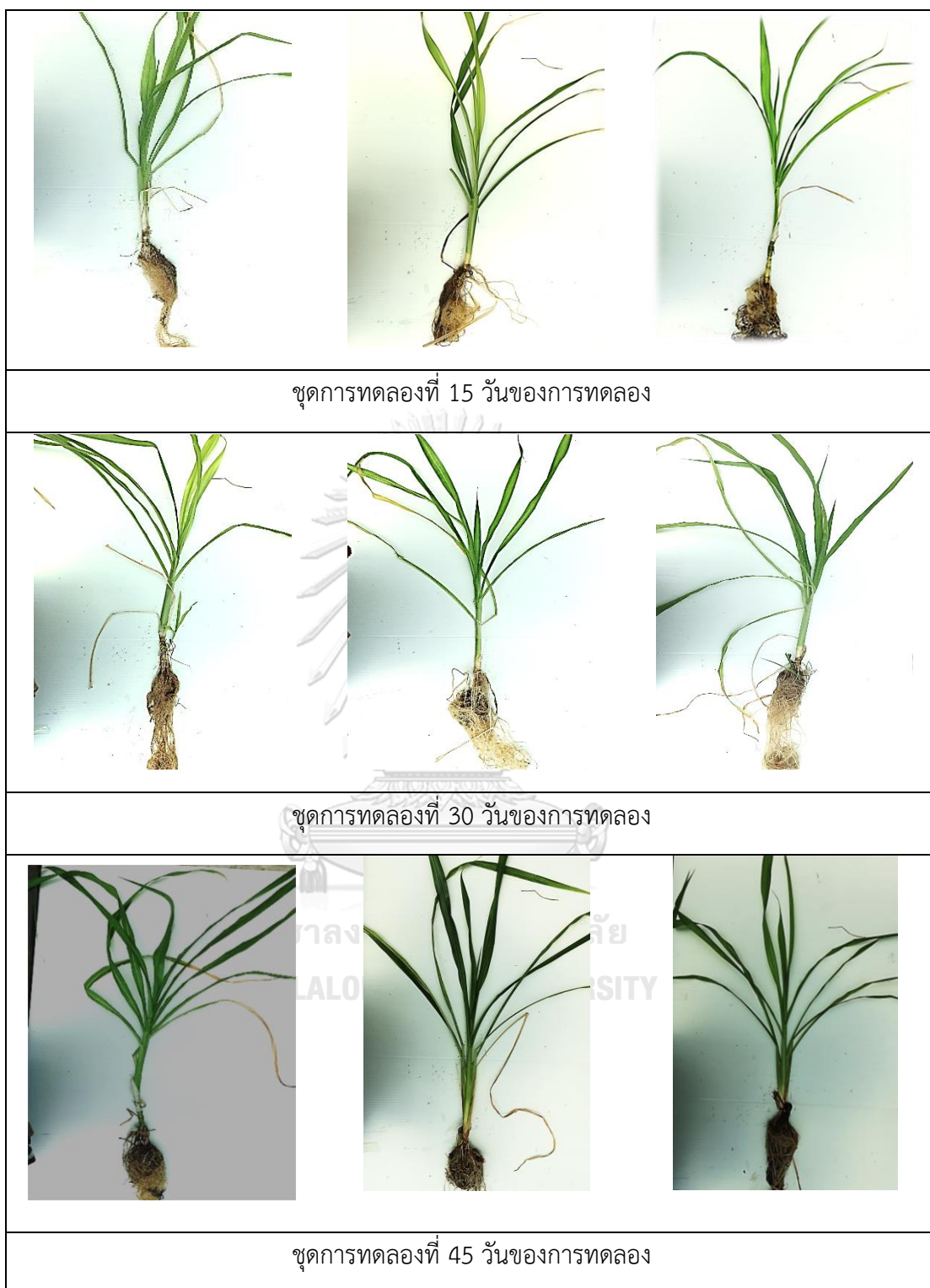
Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 105 วัน	3	682.70						
ชุดควบคุม 105 วัน	3		529.30					
1:2 โมลแคดเมียม:โมลอีดีทีเอ 97 วัน	3		543.15					
ชุดควบคุม 97 วัน	3		490.19					

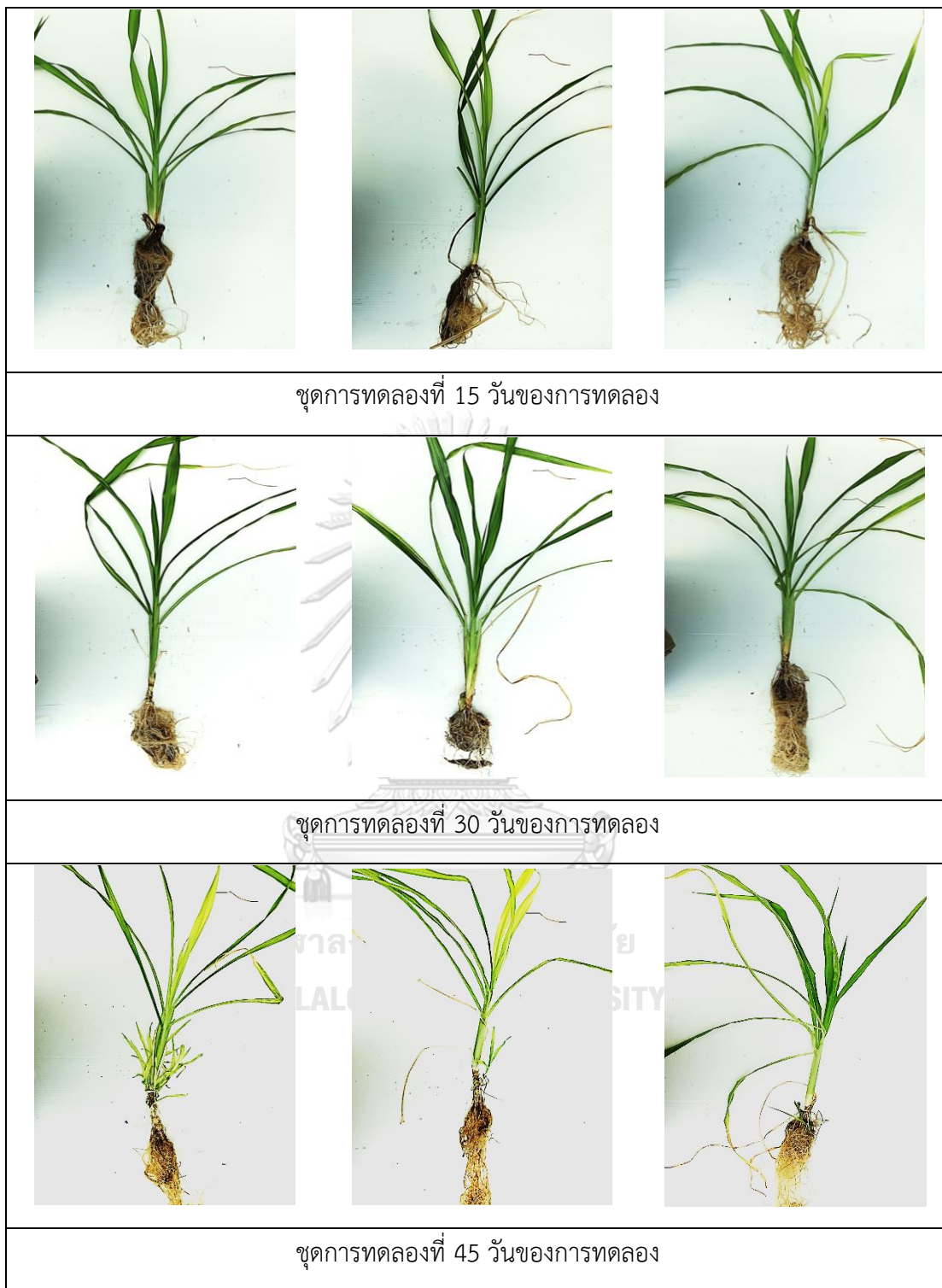
ภาคผนวก ค
การแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคะ



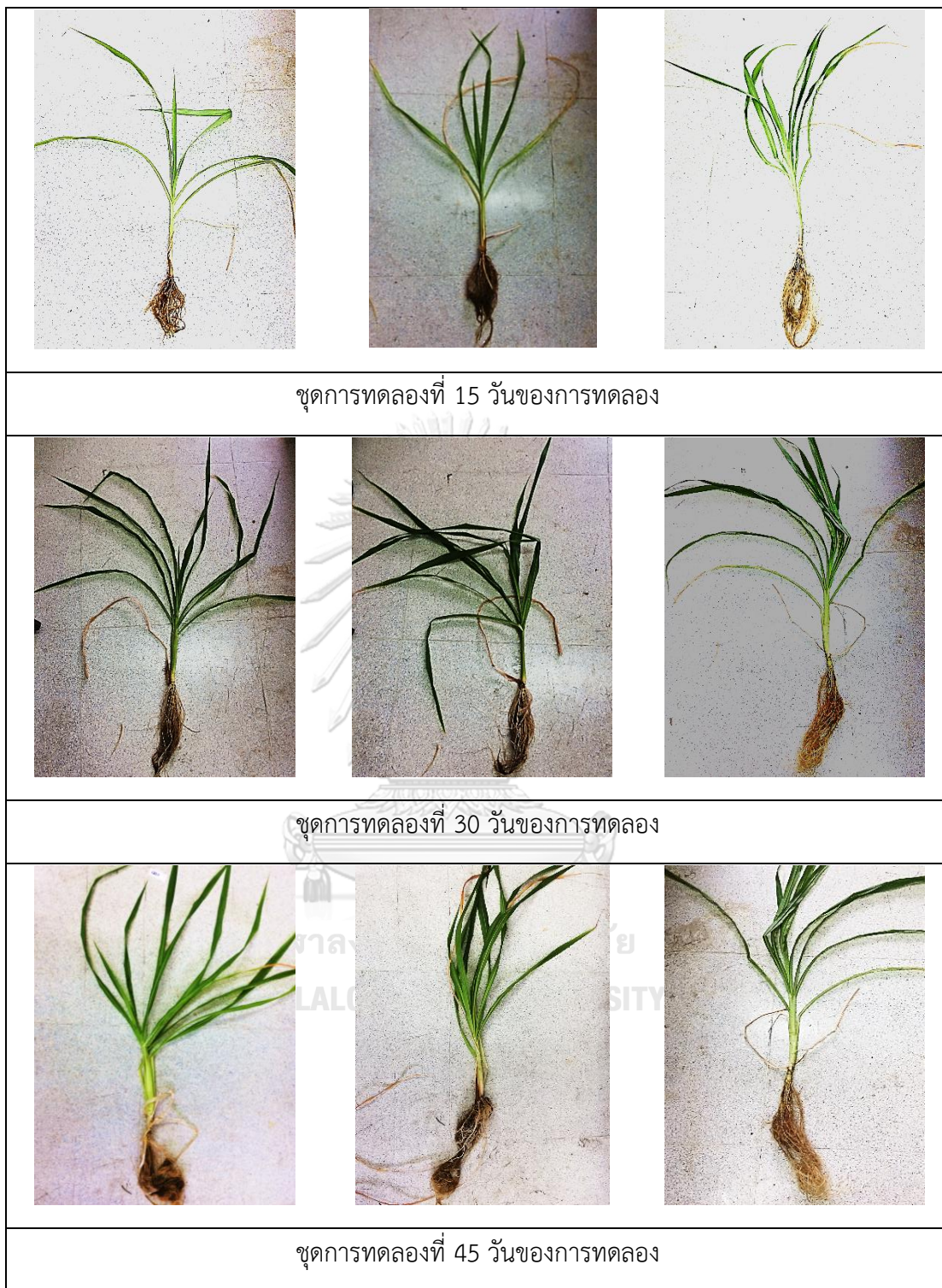
รูปที่ ค1 ผลของชุดควบคุม (แคะนมเยิม 0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ต่อการแสดงความเป็นพิษ
ของหญ้าเนเปียร์แคะ



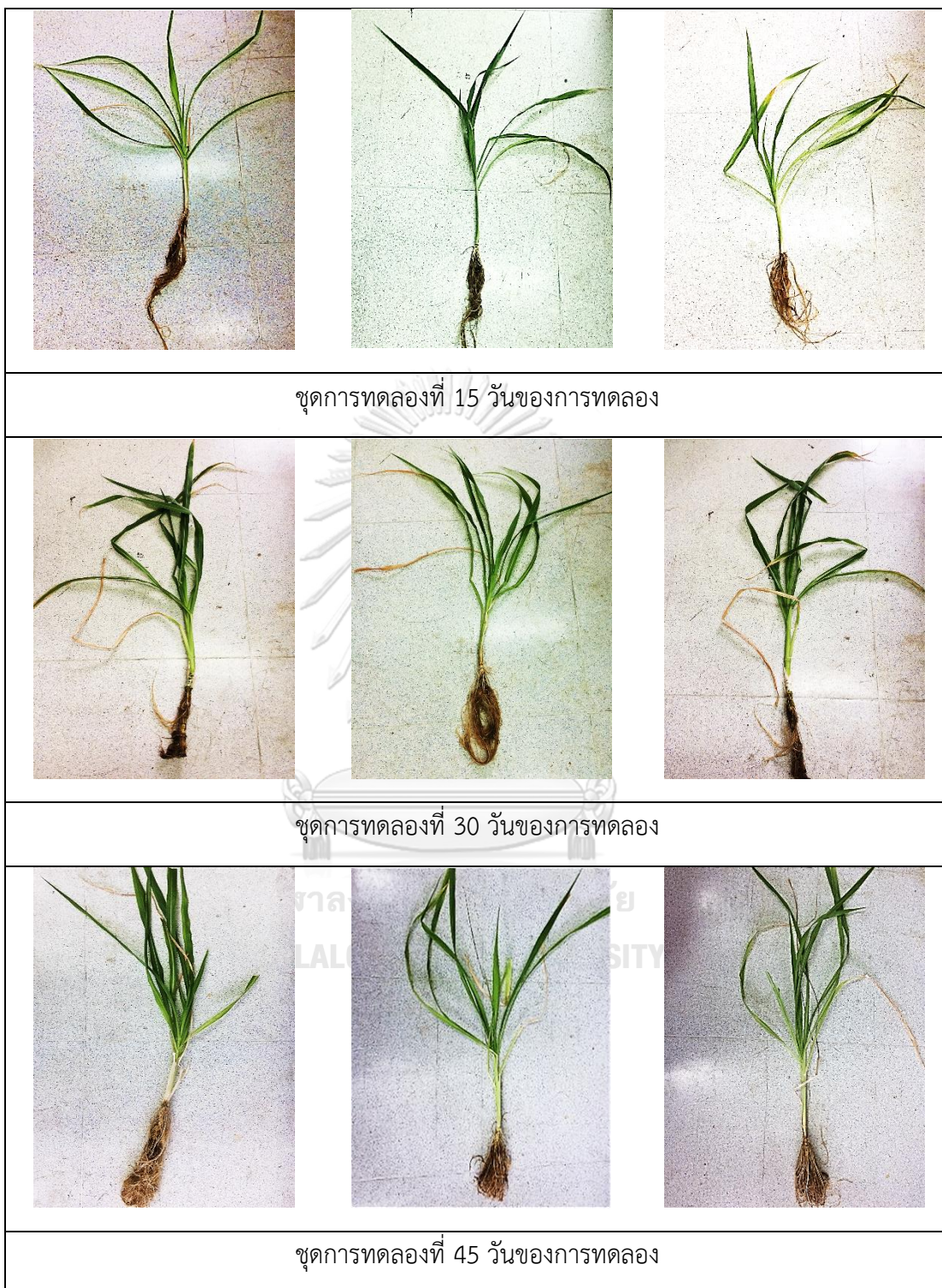
รูปที่ ค2 ผลของแคดเมียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อการแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ



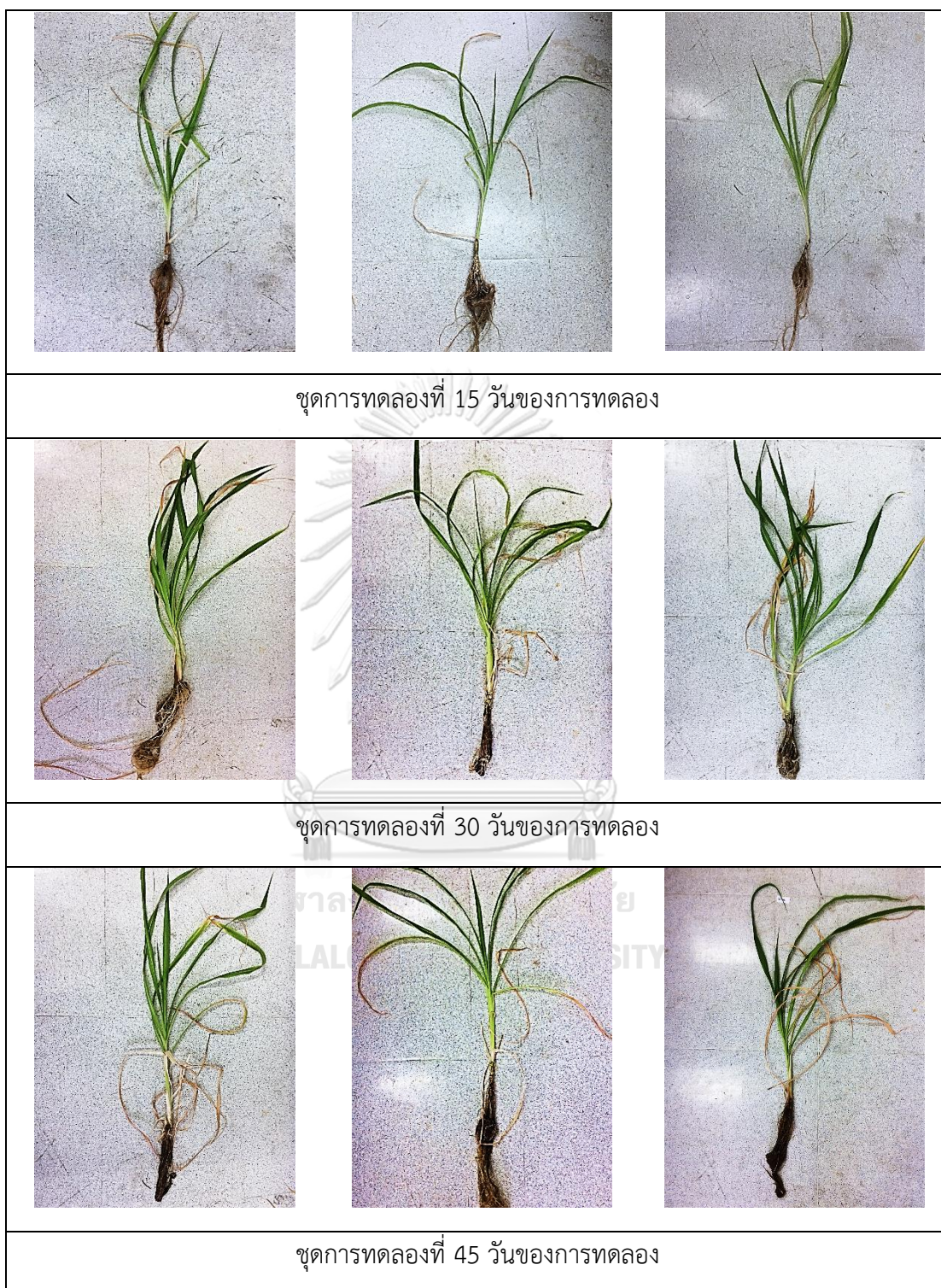
รูปที่ ค3 ผลของแคดเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อการแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ



รูปที่ ค4 ผลของแคดเมียม 60 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อการแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ



รูปที่ ค5 ผลของแคดเมียม 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อการแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ



รูปที่ ค6 ผลของแคดเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อการแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ

บรรณานุกรม

- Abdel-Salam, M.A. (2012). Chemical and phyto-remediation of clayey and sandy textured soils polluted with cadmium. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 12, 6.
- Adriano, D.C. (2001). *Trace elements in terrestrial environments* (2 ed.). New York: Springer.
- Aisien, F.A., Oboh, I.O. and Aisien, E.T. (2013). *Phytotechnology-remediation of inorganic contaminants* (Anjum, N.A., Pereira, M.E., Ahmad, I., Durate, A.C., Umar, S.andKhan, N.A. Eds.).
- Akhter, M.F., Omelon, C.R., Gordon, R.A., Moser, D. and Macfie, S.M. (2014). Localization and chemical speciation of cadmium in the roots of barley and lettuce. *Environmental and Experimental Botany*, 100, 10-19. doi:10.1016/j.envexpbot.2013.12.005
- Alloway, B.J. (1995). *Heavy metals in soils* (2 ed.). Netherlands: Springer.
- Amtaita, T.b. (2003). Food. In Hazeltine, B.andBull, C. (Eds.), *Field guide to appropriate technology* (pp. 277-480). San Diego: Academic Press.
- Anjum, N.A., Ahmad, I., Pereira, M.E., Duarte, A.C., Umar, S. and Khan, N.A.E. (2013). *The Plant Family Brassicaceae: An Introduction*.
- Arai, T., Ikemoto, T., Hokura, A., Terada, Y., Kunito, T., Tanabe, S., et al. (2004). *Chemical forms of mercury and cadmium accumulated in marine mammals and seabirds as determined by XAFS analysis* (Vol. 38).
- Baker, A., Mc Grath, S., Reeves, R. and Smith, J.A.C. (2000). *Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils* (Vol. 85).
- Baker, S. (1987). Semiologies and design theory. *Art History*, 10(2), 261-272. doi:10.1111/j.1467-8365.1987.tb00255.x
- Bazihizina, N., Redwan, M., Taiti, C., Giordano, C., Monetti, E., Masi, E., et al. (2015). Root based responses account for Psidium guajava survival at high nickel concentration. *Journal of Plant Physiology*, 174, 137-146. doi:https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.10.011
- Benavides, A.M., Duque, A.F., Duivenvoorden, J., Vasco, A. and Callejas, R. (2005). *A first quantitative census of vascular epiphytes in rain forests of colombian amazonia* (Vol. 14).
- Borsari, M. (2014). Cadmium: Inorganic chemistry. In Gupta, N.N.andAtwood, D.A. (Eds.),

- Encyclopedia of inorganic and bioinorganic chemistry*: John Wiley & Sons, Ltd.
- Boutin, C., Aya, K.L., Carpenter, D., Thomas, P.J. and Rowland, O. (2012). Phytotoxicity testing for herbicide regulation: Shortcomings in relation to biodiversity and ecosystem services in agrarian systems. *Science of The Total Environment*, 415, 79-92. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.04.046
- Brown, P.D., Morra, M.J., McCaffrey, J.P., Auld, D.L. and Williams, L. (1991). Allelochemicals produced during glucosinolate degradation in soil. *Journal of Chemical Ecology*, 17(10), 2021-2034. doi:10.1007/bf00992585
- Burgot, J.L. (2012). Complexometry III: Metal cation indicators and types of EDTA titrations. In *Ionic equilibria in analytical chemistry* (pp. 525-541). New York, NY: Springer New York.
- Chang, G., Bell, N.B.J. and Power, S. (2003). *Effects of soil cadmium on Pinus sylvestris L. seedlings* (Vol. 257).
- Chang, L.W. and Tjalkens, R.B. (2010). Neurotoxicology of metals*. In Queen, M., Charlene and A. (Eds.), *Comprehensive toxicology* (pp. 483-497). Oxford: Elsevier.
- Chaudhry, Q., Schröder, P., Werck-Reichhart, D., Grajek, W. and Marecik, R. (2002). Prospects and limitations of phytoremediation for the removal of persistent pesticides in the environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 9(1), 4. doi:10.1007/bf02987313
- Chen, Y., Li, X. and Shen, Z. (2004). Leaching and uptake of heavy metals by ten different species of plants during an EDTA-assisted phytoextraction process. *Chemosphere*, 57(3), 187-196. doi:10.1016/j.chemosphere.2004.05.044
- Chen, Y., Shen, Z.G. and Li, X.D. (2004). *The use of vetiver grass (Vetiveria zizanioides) in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals* (Vol. 19).
- Chitra, Y., Sharavanan, P.S. and Vijayaragavan, M. (2011). *Tobacco, corn and wheat for phytoremediation of cadmium polluted soil* (Vol. 3).
- Crisponi, G. and Nurchi, V.M. (2016). Chelating agents as therapeutic compounds basic principles. In Aaseth, J., Crisponi, G. and Andersen, O. (Eds.), *Chelation therapy in the treatment of metal intoxication* (pp. 35-61). Boston: Academic press.
- Curie, C., Cassin, G., Couch, D., Divol, F., Higuchi, K., Le Jean, M., et al. (2009). Metal movement within the plant: contribution of nicotianamine and yellow stripe 1-like transporters. *Ann Bot*, 103(1), 1-11. doi:10.1093/aob/mcn207
- Ensley, B.D. (2000). Rationale for use of phytoremediation. In Raskin I., E.B.D. (Ed.), *Phytoremediation of toxic metals using plants to clean up the environment* (pp. 3-12): John Wiley and Sons.
- Enstone, D., Peterson, C. and Fengshan, M. (2003). *Root endodermis and exodermis*:

structure, function, and responses to the environment (Vol. 21).

- Evangelou, M.W.H., Ebel, M. and Schaeffer, A. (2007). Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents. *Chemosphere*, 68(6), 989-1003. doi:10.1016/j.chemosphere.2007.01.062
- Feng, L., Wei, D.M., Lin, S.T., Maddison, R., Ni Mhurchu, C., Jiang, Y., et al. (2017). Systematic review and meta-analysis of school-based obesity interventions in mainland China. *PloS one*, 12(9), e0184704-e0184704. doi:10.1371/journal.pone.0184704
- Fojtova, M. and Kovarik, A. (2000). Genotoxic effect of cadmium is associated with apoptotic changes in tobacco cells. *Plant, Cell and Environment*, 23(5), 531-537. doi:10.1046/j.1365-3040.2000.00573.x
- Fukuda, N., Hokura, A., Kitajima, N., Terada, Y., Saito, H., Abe, T., et al. (2008). Micro X-ray fluorescence imaging and micro X-ray absorption spectroscopy of cadmium hyper-accumulating plant, *Arabidopsis halleri* ssp. *gemmaifera*, using high-energy synchrotron radiation. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23(8), 1068-1075. doi:10.1039/B803602K
- Gill, S.S. and Tuteja, N. (2011). Cadmium stress tolerance in crop plants. *Plant signaling and behavior*, 6(2), 215-222. doi:10.4161/psb.6.2.14880
- Ginkel, V.C.G., Kester, H., Stroo, C.A. and Haperen, A.M.V. (1999). Biodegradation of EDTA in pulp and paper mill effluents by activated sludge. *Water Science and Technology*, 40(11), 259-265. doi:10.1016/S0273-1223(99)00726-X
- Gomathi, R., Vasantha, S. and Thandapani, V. (2010). *Mechanism of osmo regulation in response to salinity stress in sugarcane* (Vol. 12).
- Gomes, D.G., Guimarães, P.M.R., Pereira, F.B., Teixeira, J.A. and Domingues, L. (2012). Plasmid-mediate transfer of FLO1 into industrial *Saccharomyces cerevisiae* PE-2 strain creates a strain useful for repeat-batch fermentations involving flocculation–sedimentation. *Bioresource Technology*, 108, 162-168. doi:10.1016/j.biortech.2011.12.089
- Good, C., Davidson, J., Welsh, C., Snekvik, K. and Summerfelt, S. (2011). The effects of ozonation on performance, health and welfare of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in low-exchange water recirculation aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 44(3), 97-102. doi:10.1016/j.aquaeng.2011.04.003
- Greger, J.L. (1999). Nutrition versus toxicology of manganese in humans: evaluation of potential biomarkers. *Neurotoxicology*, 20(2-3), 205-212.
- Guigan, M.C. and Michael, A. (2012). Chronic poisoning: Trace metals and others. In Goldman, L. and Schafer, A.I. (Eds.), *Goldman's Cecil medicine (twenty fourth*

- edition) (pp. 88-95). Philadelphia: W.B. Saunders.
- Harvey, D. (2011). Analytical Chemistry In 2 (Ed.), *Complexation Titrations*. Open-access digital textbook: Analytical and bioanalytical chemistry.
- Hediji, H., Djebali, W., Cabasson, C., Maucourt, M., Baldet, P., Bertrand, A., et al. (2010). *Effects of long-term cadmium exposure on growth and metabolomic profile of tomato plants* (Vol. 73).
- Hernandez-Allica, J., Garbisu, C., Barrutia, O. and Becerril, J.M. (2007). EDTA-induced heavy metal accumulation and phytotoxicity in cardoon plants. *Environmental and Experimental Botany*, 60(1), 26-32. doi:10.1016/j.envexpbot.2006.06.006
- Hodgson, J.D. (1963). Automation-A study in promise, problems, and polemics. *Human Resource Management*, 2(3), 1-9. doi:10.1002/hrm.3930020302
- Holmgren, G.G.S., Meyer, M.W., Rufus, C. and Daniels, R.b. (1993). *Cadmium, lead, zinc, copper, and nickel in agricultural soils of the United States of America* (Vol. 22).
- Hooser, S.B. (2007). Chapter 27 cadmium. In Gupta and R.C. (Eds.), *Veterinary toxicology* (pp. 422-426). Oxford: Academic press.
- Hu, L., Wang, R., Liu, X., Xu, B., Xie, T., Li, Y., et al. (2018). Cadmium phytoextraction potential of king grass (*Pennisetum sinense* Roxb.) and responses of rhizosphere bacterial communities to a cadmium pollution gradient. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(22), 21671-21681. doi:10.1007/s11356-018-2311-9
- IPCS (Ed.) (1992). *Cadmium environmental aspects*. Geneva: World Health Organization.
- Isaure, M.P., Fraysse, A., Devès, G., Le Lay, P., Fayard, B., Susini, J., et al. (2006). Micro-chemical imaging of cesium distribution in *Arabidopsis thaliana* plant and its interaction with potassium and essential trace elements. *Biochimie*, 88(11), 1583-1590. doi:10.1016/j.biochi.2006.08.006
- Ishii, Y., Hamano, K., Kang, D.J., Idota, S. and Nishiwaki, A. (2015). Cadmium phytoremediation potential of napiergrass cultivated in Kyushu, Japan. *Applied and Environmental Soil Science*, 2015, 6. doi:10.1155/2015/756270
- Ishii, Y., Hamano, K., Kang, D.J., Kannika, R., Idota, S., Fukuyama, K., et al. (2013). C4-napier grass cultivation for cadmium phytoremediation activity and organic livestock farming in kyushu, japan *Journal of Agricultural Science and Technology*, A3, 9.
- Jalil, A., Selles, F. and Clarke, J.M. (1994). Effect of cadmium on growth and the uptake of cadmium and other elements by durum wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 17(11), 1839-1858. doi:10.1080/01904169409364851
- Jarvis, S.C., Jones, L.H.P. and Hopper, M.J. (1976). Cadmium uptake from solution by plants and its transport from roots to shoots. *Plant and Soil*, 44(1), 179-191.

doi:10.1007/bf00016965

- Javot, H. and Maurel, C. (2002). The role of aquaporins in root water uptake. *Annals of botany*, 90(3), 301-313. doi:10.1093/aob/mcf199
- Jean, L., Bordas, F., Gautier-Moussard, C., Vernay, P., Hitmi, A. and Bollinger, J.C. (2008). Effect of citric acid and EDTA on chromium and nickel uptake and translocation by *Datura innoxia*. *Environmental pollution*, 2008 v.153 no.3(no. 3), pp. 555-563. doi:10.1016/j.envpol.2007.09.013
- Kathal, R., Malhotra, P. and Chaudhary, V. (2016). *Phytoremediation of cadmium from polluted soil* (Vol. 07).
- Kersten, G., Majestic, B. and Quigley, M. (2016). *Phytoremediation of cadmium and lead-polluted watersheds* (Vol. 137).
- Khairy, A.I.H., Oh, M.J., Lee, S.M., Kim, D.S. and Roh, K.S. (2016). Nitric oxide overcomes Cd and Cu toxicity in in vitro-grown tobacco plants through increasing contents and activities of rubisco and rubisco activase. *Biochim Open*, 2, 41-51. doi:10.1016/j.biopen.2016.02.002
- Kirker, G.T., Bishell, A.B., Jusino, M.A., Palmer, J.M., Hickey, W.J. and Lindner, D.L. (2017). Amplicon-based sequencing of soil fungi from wood preservative test sites. *Frontiers in Microbiology*, 8(1997). doi:10.3389/fmicb.2017.01997
- Kochian, L. (1991). *Mechanisms of micronutrient uptake and translocation in plants*.
- Kongmuang, K. and Sampanpanish, P. (2010). *Effect of EDTA citric acid on cadmium uptake by water hyacinth*. Paper presented at the The Mae Fah Luang Symposium 2010 on the Occasion of the 12th Anniversary, Mae Fah Luang University.
- Kopittke, G.R., van Loon, E.E., Tietema, A. and Asscheman, D. (2013). Soil respiration on an aging managed heathland: identifying an appropriate empirical model for predictive purposes. *Biogeosciences*, 10(5), 3007-3038. doi:10.5194/bg-10-3007-2013
- Koren, S., Arcon, I., Kump, P., Necemer, M. and Vogel-Mikus, K. (2013). *Influence of CdCl₂ and CdSO₄ supplementation on Cd distribution and ligand environment in leaves of the Cd hyperaccumulator Noccaea (Thlaspi) praecox* (Vol. 370).
- Kuzovkina, Y.A., Knee, M. and Quigley, M.F. (2004). Cadmium and copper uptake and translocation in five Willow (*Salix* L.) Species. *International Journal of Phytoremediation*, 6(3), 269-287. doi:10.1080/16226510490496726
- Lai, H.Y. and Chen, Z.S. (2005). The EDTA effect on phytoextraction of single and combined metals-contaminated soils using rainbow pink (*Dianthus chinensis*). *Chemosphere*, 60(8), 1062-1071. doi:10.1016/j.chemosphere.2005.01.020

- Lawal, M. and Ologundudu, S.O. (2013). *Toxicity of cigarette filter leachates on Hymenochirus curtipes and Clarias Gariepinus in Nigeria* (Vol. 11).
- Lee, J. and Sung, K. (2014). Effects of chelates on soil microbial properties, plant growth and heavy metal accumulation in plants. *Ecological Engineering*, 73, 386-394. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.053>
- Liu, F., Tang, Y., Du, R., Yang, H., Wu, Q., et al. (2010). Root foraging for zinc and cadmium requirement in the Zn/Cd hyperaccumulator plant *Sedum alfredii*. *Plant and Soil*, 327(1), 365-375. doi:10.1007/s11104-009-0060-8
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S.R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., et al. (2007). Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 317(5844), 1513-1516. doi:10.1126/science.1144004
- Lombi, E., Jonge de, M.D., Donner, E., Kopittke, P.M., Howard, D.L., Krikham, R., et al. (2011). Fast X-ray fluorescence microtomography of hydrated samples. *Plos One*.
- Lombi, E., Scheckel, K.G., Pallon, J., Carey, A.M., Zhu, Y.G. and Meharg, A.A. (2009). Speciation and distribution of arsenic and localization of nutrients in rice grains. *New Phytologist*, 184(1), 193-201. doi:10.1111/j.1469-8137.2009.02912.x
- Lu, L.L., Tian, S.K., Yang, X., Peng, H.Y. and Li, T. (2013). Improved cadmium uptake and accumulation in the hyperaccumulator *Sedum alfredii*: the impact of citric acid and tartaric acid. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 14(2), 106-114. doi:10.1631/jzus.B1200211
- Lu, X., Kruatrachue, M., Pokethitiyookb, P. and Homyok, K. (2004). Removal of cadmium and zinc by water hyacinth, *Eichhornia crassipes*. *ScienceAsia*, 2004(30), 10. doi:10.2306/scienceasia1513-1874.2004.30.093
- Maruthi, S.B., Han, F.V., Diehl, S.L., Monts, D. and Su, Y. (2007). *Effects of Zn and Cd accumulation on structural and physiological characteristics of barley plants* (Vol. 19).
- Meers, E., Lesage, E., Lamsal, S., Hopgood, M., Vervaeke, P., Tack, F.M.G., et al. (2005). Enhanced phytoextraction: I. effect of EDTA and citric acid on heavy metal mobility in a calcareous soil. *International Journal of Phytoremediation*, 7(2), 129-142. doi:10.1080/16226510590950423
- Mendes, L.F., Zambotti-Villela, L., Simas-Rodrigues, C. and Colepicolo, P. (2015). Toxicological effects of metal-EDTA/NTA complex formation in a synthetic medium on the macroalga *Gracilaria domingensis*. *Journal of Applied Phycology*, 27(3), 1307-1314. doi:10.1007/s10811-014-0426-z
- Mishra, V.K. and Tripathi, B.D. (2009). Accumulation of chromium and zinc from aqueous solutions using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Journal of Hazardous*

- Materials*, 164(2), 1059-1063. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.09.020
- Mohanpuria, P., Rana, N.K. and Yadav, S.K. (2008). Biosynthesis of nanoparticles: technological concepts and future applications. *Journal of nanoparticle research*, 10(3), 507-517. doi:10.1007/s11051-007-9275-x
- Mongkhonsin, B., Nakbanpote, W., Hokura, A., Nuengchamnong, N. and Maneechai, S. (2016). Phenolic compounds responding to zinc and/or cadmium treatments in *Gynura pseudochina* (L.) DC. extracts and biomass. *Plant Physiology and Biochemistry*, 109, 549-560. doi:10.1016/j.plaphy.2016.10.027
- Mosa, A., Taha, A.A., Ibrahim, M.H. and El-Gahmery, M.A. (2011). *Protective effect of humic acid and chitosan on radish (Raphanus sativus, L. var. sativus) plants subjected to cadmium stress* (Vol. 7).
- Muhammad, D., Chen, F., Zhao, J., Zhang, G. and Wu, F. (2009). Comparison of EDTA- and citric acid-enhanced phytoextraction of heavy metals in artificially metal contaminated soil by *Typha angustifolia*. *International Journal of Phytoremediation*, 11(6), 558-574. doi:10.1080/15226510902717580
- Namdjoyan, S.H., Khavari-Nejad, R.A., Bernard, F., Nejadstattari, T. and Shaker, H. (2011). Antioxidant defense mechanisms in response to cadmium treatments in two safflower cultivars. *Russian Journal of Plant Physiology*, 58(3), 467. doi:10.1134/s1021443711030149
- Namiki, Y., Ueno, K., Mitani, H., Virtudazo, E.V., Ohkusu, M., Shimizu, K., et al. (2011). Scanning and negative-staining electron microscopy of protoplast regeneration of a wild-type and two chitin synthase mutants in the pathogenic yeast *Candida glabrata*. *J Electron Microsc (Tokyo)*, 60(2), 157-165. doi:10.1093/jmicro/dfq082
- Nanthavong, K. and Sampanpanish, P. (2015). *Effect of NTA and EDTA on arsenic uptake from contaminated soil by Mimosa Pudica* (Vol. 9).
- Nowack, B. (2008). Chelating agents and the environment. *Environmental pollution*, 153(1), 1-2. doi:https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.12.016
- Oviedo, C. and Rodríguez, J. (2003). EDTA: the chelating agent under environmental scrutiny. *Química Nova*, 26, 901-905.
- Paine, C.E.T., Amissah, L., Auge, H., Baraloto, C., Baruffol, M., Bourland, N., et al. (2015). Globally, functional traits are weak predictors of juvenile tree growth, and we do not know why. *Journal of Ecology*, 103(4), 978-989. doi:10.1111/1365-2745.12401
- Panitlertumpai, N., Mongkhonsin, B., Nakbanpote, W. and Ponlakit, J. (2008). *Zinc hyperaccumulation by Gynura pseudochina (L.) DC.*
- Panitlertumpai, N., Nakbanpote, W., Sangdee, A., Thumanu, K., Nakai, I. and Hokura, A.

- (2013). *Zinc and/or cadmium accumulation in Gynura pseudochina (L.) DC. studied in vitro and the effect on crude protein* (Vol. 1036).
- Parrotta, L., Guerriero, G., Sergeant, K., Cai, G. and Hausman, J.F. (2015). Target or barrier? The cell wall of early- and later-diverging plants vs cadmium toxicity: differences in the response mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 6(133). doi:10.3389/fpls.2015.00133
- Paunov, M., Koleva, L., Vassilev, A., Vangronsveld, J. and Goltsev, V. (2018). Effects of different metals on photosynthesis: Cadmium and zinc affect chlorophyll fluorescence in durum wheat. *International journal of molecular sciences*, 19(3), 787. doi:10.3390/ijms19030787
- Peer, A.P., Baxter, I.R., Richards, E.L., Freeman, J.L. and Murphy, A.S. (2007,). Phytoremediation and Hyperaccumulator Plants Retrieved from <http://www.hort.purdue.edu/hort/research/murphy/pdfs/metals11.pdf>
- Pendias, K.A. and Pendias, H. (2000). *Trace elements in soil and plants*. (3 ed.). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Pietrini, F., Iori, V., Muzzini, V., Pietropaoli, S., Mughini, G., Beni, C., et al. (2015). *Phytoremediation of cadmium polluted water hybrid clone: a mesocosm study*.
- Prasad, M.N.V. (2008). *Trace element as contaminants and nutrients*: John Wiley & Sons.
- Rababah, A. and Al-Shuha, A. (2009). Hydroponics reducing effluent's heavy metals discharge. *Water Science and Technology*, 59(1), 175-183. doi:10.2166/wst.2009.736
- Ramachandra, B. and Narayana, B. (1997). Indirect complexometric determination of cadmium(II) using 1,10-phenanthroline as selective masking agent. *Microchimica Acta*, 126(3), 223-225. doi:10.1007/bf01242324
- Raskin, I. and Ensley, D. (2000). *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment*. New York.: John Wiley & Sons.
- Razuvaev, G.A., Domrachev, G.A., Suvorova, O.N. and Abakumova, L.G. (1971). Synthesis and stability of mixed sandwich chelate transition metal complexes. *Journal of Organometallic Chemistry*, 32(1), 113-120. doi:10.1016/S0022-328X(00)80165-5
- Reddy, K.R. (2008). *Physical and chemical groundwater remediation technologies*, Dordrecht.
- Reddy, K.R. and Patrick, W.H. (1977). Effect of placement and concentration of applied NH_4^+ -N on nitrogen loss from flooded soil. *Soil Science*, 123(3), 142-148.
- Reeves, P.G. and Chaney, R.L. (2008). Bioavailability as an issue in risk assessment and

- management of food cadmium: a review. *Sci Total Environ*, 398(1-3), 13-19. doi:10.1016/j.scitotenv.2008.03.009
- Sabeen, M., Mahmood, Q., Muhammad, I., Fareed, I., Khan, A., Farid, U., et al. (2013). Cadmium phytoremediation by *arundo donax* L. from contaminated soil and water. *Hindawi Publishing Corporation Biomed Research International*, 2013, 9.
- Saha, P., Shinde, O. and Sarkar, S. (2017). Phytoremediation of industrial mines wastewater using water hyacinth. *International Journal of Phytoremediation*, 19(1), 87-96. doi:10.1080/15226514.2016.1216078
- Salimi, M., Amin, M., Ebrahimi, A., Ghazifard, A. and Najafi, P. (2012). Influence of electrical conductivity on the phytoremediation of contaminated soils to Cd²⁺ and Zn²⁺. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 1(1), 11-11.
- Salt, D.E., Blaylock, M., Kumar, N.P., Dushenkov, V., Ensley, B.D., Chet, I., et al. (1995). Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology* 13(5), 468-474.
- Salt, D.E., Smith, R.D. and Raskin, I. (1998). Phytoremediation. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 49, 643-668. doi:10.1146/annurev.arplant.49.1.643
- Sampanpanish, P. and Hongpiriyakul, Y. (2018). *Pb removal from contaminated water using EDTA with colocasiaesculenta (L.) Schott at Klity creek, Kanchanaburi, Thailand* (Vol. 14).
- Sampanpanish, P., Khaodhiar, S., Pongsapich, W. and Khan, E. (2007). *Alternative for chromium removal: Phytoremediation and biosorption with weed plant species in Thailand* (Vol. 33).
- Sampanpanish, P. and Pinpa, K. (2017). *Effect Of Edta, Dtpa And Ph on cadmium uptake by water hyacinth from contaminated sediment*. Paper presented at the The IRES 94th International Conference, Taipei, Taiwan
- Santos, S.F., Hernandez-Allica, J., Becerril, M.J., Amaral-Sobrino, N., Mazur, N. and Garbicu, C. (2006). Chelate-induced phytoextraction of metal polluted soils with *Brachiaria decumbens*. *Chemosphere*, 65, 7.
- Schön, G., Geywitz, S. and Mertens, F. (1993). Influence of dissolved oxygen and oxidation-reduction potential on phosphate release and uptake by activated sludge from sewage plants with enhanced biological phosphorus removal. *Water Research*, 27(3), 349-354. doi:10.1016/0043-1354(93)90033-E
- Schreiber, L. (2010). Transport barriers made of cutin, suberin and associated waxes. *Trends in Plant Science*, 15(10), 546-553. doi:10.1016/j.tplants.2010.06.004
- Seregin, I. and Kozhevnikova, A. (2004). *Strontium transport, distribution, and toxic*

- effects on maize seedling growth* (Vol. 51).
- Smith, E., Kempson, I., Juhasz, A.L., Weber, J., Skinner, W.M. and Gräfe, M. (2009). Localization and speciation of arsenic and trace elements in rice tissues. *Chemosphere*, 76(4), 529-535. doi:10.1016/j.chemosphere.2009.03.010
- Son, J.E., Kim, H.J. and Ahn, T.I. (2016). Hydroponic Systems. In Kozai, T., Niu, G. and Takagaki, M. (Eds.), *Plant Factory* (pp. 213-221). San Diego: Academic Press.
- Song, J.Y., Park, J.S., Kang, C.D., Cho, H.Y., Yang, D., Lee, S.M., et al. (2016). Introduction of a bacterial acetyl-CoA synthesis pathway improves lactic acid production in *Saccharomyces cerevisiae*. *Metabolic Engineering*, 35, 38-45. doi:https://doi.org/10.1016/j.ymben.2015.09.006
- Song, Y., Jin, L. and Wang, X. (2016). *Cadmium absorption and transportation pathways in plants* (Vol. 19).
- Speight, J.G. (2017). Removal of inorganic compounds from the environment. In Speight, J.G. (Ed.), *Environmental inorganic chemistry for engineers* (pp. 427-478): Butterworth-Heinemann.
- Stieger, P.A. and Feller, U.R.S. (1994). Nutrient accumulation and translocation in maturing wheat plants grown on waterlogged soil. *Plant and Soil*, 160(1), 87-95.
- Stoeppler, M. (1992). Chapter 8 - Cadmium. In Stoeppler, M. (Ed.), *Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry* (Vol. 12, pp. 177-230): Elsevier.
- Suksawat, S. (2002). *The effectiveness of an application of the self-efficacy theory and social support to behavioral modification among patients with pulmonary tuberculosis attending services at Tuberculosis Division Department of Communicable Disease Control*. Mahidol University,
- Suzuki, M., Yamada, T., Miyazaki, T. and Kawazoe, K. (1979). *Sorption and accumulation of cadmium in the sediment of the Tama River* (Vol. 13).
- Tananonchai, A. and Sampanpanish, P. (2014). Effect of EDTA and DTPA on cadmium removal from contaminated soil with water hyacinth. *Applied Environmental Research*, 36(3), 11. doi:10.14456/aer.2014.25
- Tananonchai, A. and Sampanpanish, P. (2018). Phytotolerance, phytotoxicity and phytoremediation of Cd and EDTA mixtures with napier grass. *EnvironmentAsia*, 11(1), 10. doi:10.14456/ea.2018.12
- Theisen, R. (1965). Detection Limit, detection threshold and microprobe trace analysis. In *Quantitative electron microprobe analysis* (pp. 22-24). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Theisen R. (1965). General features of electron microprobe analysis. In *Quantitative electron microprobe analysis* (pp. 1-6). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin

Heidelberg.

- Tian, S., Lu, L., Labavitch, J., Yang, X., He, Z., Hu, H., et al. (2011). Cellular sequestration of cadmium in the hyperaccumulator plant species *Sedum alfredii*. *Plant physiology*, 157(4), 1914-1925. doi:10.1104/pp.111.183947
- Trebolazabala, J., Maguregui, M., Morillas, H., de Diego, A. and Madariaga, J.M. (2017). Evaluation of metals distribution in *Solanum lycopersicum* plants located in a coastal environment using micro-energy dispersive X-ray fluorescence imaging. *Microchemical Journal*, 131, 137-144. doi:10.1016/j.microc.2016.12.009
- USEPA. (1996). Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based materices (method 3052). In. Washington D.C., United States of America.
- USEPA. (1998). Assisted acid digestion of aqueous sample and extracts (Method. 3015A). In. Washington D.C., USA.
- USEPA. (2000). Introduction to phytoremediation. In. Ohio, USA.: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, United States of America.
- Van Engelen, D.L., Boyd, J.S. and Ekbia, K. (2011). Effect of Calcium and EDTA on the Uptake of Cadmium and Lead by *Brassica juncea* in Hydroponic Growth Medium. In *It's All in the Water: Studies of Materials and Conditions in Fresh and Salt Water Bodies* (Vol. 1086, pp. 35-50): American Chemical Society.
- Van Engelen, D.L., Sharpe-Pedler, R.C. and Moorhead, K.K. (2007). Effect of chelating agents and solubility of cadmium complexes on uptake from soil by *Brassica juncea*. *Chemosphere*, 68(3), 401-408.
- Vangronsveld, J. and Cunningham, S.D. (1998). *Metal-contaminated soils: In situ inactivation and phytoremediation*: Springer.
- Verbruggen, N., Hermans, C. and Schat, H. (2009). Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. *New Phytol*, 181(4), 759-776. doi:10.1111/j.1469-8137.2008.02748.x
- Wadeesirisak, S. and Sampanpanish, P. (2007). The use of *Phyllanthus Reticulatus* for removal of hexavalent chromium from contaminated soil. *Journal of Environmental Research.*, 29(2), 8.
- Waller, P. and Yitayew, M. (2016). Hydroponic irrigation systems. In *Irrigation and drainage engineering* (pp. 369-386). Cham: Springer International Publishing.
- Wang, S., Jin, X., Jiao, L. and Wu, F. (2009). Response in root morphology and nutrient contents of *Myriophyllum spicatum* to sediment type. *Ecological Engineering*, 35(8), 1264-1270. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.05.012
- Wang, F. and Tessier, A. (1999). Cadmium complexation with bisulfide. *Environmental*

- science and technology*, 33(23), 4270-4277. doi:10.1021/es990283z
- Wang, K.S., Huang, L.C., Lee, H., Chen, P.Y. and Chang, S.H. (2008). *Phytoextraction of cadmium by Ipomoea aquatica (water spinach) in hydroponic solution: Effects of cadmium speciation* (Vol. 72).
- Welch, R.M. and Norvell, W.A. (1999). Mechanisms of cadmium uptake, translocation and deposition in plants. In McLaughlin, M.J. and Singh, B.R. (Eds.), *Cadmium in soils and plants* (pp. 125-150). Dordrecht: Springer Netherlands.
- White, P.J. and Brown, P.H. (2010). Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, 105(7), 1073-1080. doi:10.1093/aob/mcq085
- Wiangkham, N. and Prapagdee, B. (2018). *Potential of napier grass with cadmium-resistant bacterial inoculation on cadmium phytoremediation and its possibility to use as biomass fuel* (Vol. 201).
- Willick, I.R., Tanino, K.K., Vijayan, P., Karunakaran, C. and Lahlali, R. (2015). Synchrotron radiation sheds fresh light on plant research: the use of powerful techniques to probe structure and composition of plants. *Plant and Cell Physiology*, 56(7), 1252-1263. doi:10.1093/pcp/pcv080
- Wójcik, M., Vangronsveld, J. and Tukiendorf, A. (2005). Cadmium tolerance in *Thlaspi caerulescens* - I. Growth parameters, metal accumulation and phytochelatin synthesis in response to cadmium. *Environmental and Experimental Botany*, 53(2), 151-161. doi:10.1016/j.envexpbot.2004.03.010
- Wu, L.H., Luo, Y.M., Xing, X.R. and Christie, P. (2004). EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil with Indian mustard and associated potential leaching risk. *Agriculture ecosystem and environment*, 102, 11. doi:10.1016/j.agee.2003.09.002
- Yang, X., Baligar, V.C., Martens, D.C. and Clark, R.B. (1996). Cadmium effects on influx and transport of mineral nutrients in plant species. *Journal of Plant Nutrition*, 19(3-4), 643-656. doi:10.1080/01904169609365148
- Yang, Y., Ge, Y., Zeng, H., Zhou, X., Peng, L. and Zeng, Q. (2017). Phytoextraction of cadmium-contaminated soil and potential of regenerated tobacco biomass for recovery of cadmium. *Scientific reports*, 7(1), 7210-7210. doi:10.1038/s41598-017-05834-8
- Yoon, J.M., Oliver, D.J. and Shanks, J.V. (2007). Phytotoxicity and phytoremediation of 2,6-dinitrotoluene using a model plant, *Arabidopsis thaliana*. *Chemosphere*, 68(6), 1050-1057. doi:10.1016/j.chemosphere.2007.02.003
- Zayed, A., Lytle, C.M. and Terry, N. (1998). Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants. *Planta*, 206(2), 284-292.

doi:10.1007/s004250050402

Zhang, X., Gao, B. and Xia, H. (2014). Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of bana grass and vetiver grass. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 106, 102-108. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.04.025>

Zhao, L., Guo, Y., Ji, X. and Zhang, M. (2014). The neuroprotective effect of picoside II via regulating the expression of myelin basic protein after cerebral ischemia injury in rats. *BMC Neuroscience*, 15(1), 25. doi:10.1186/1471-2202-15-25

ภาษาไทย

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2547). การปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก.

พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535, (2535).

กระทรวงพลังงาน, ก. (2556). ฐานเนเปียร์ พืชพลังงานสีเขียว. Retrieved from <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/152>

พันธุ์ศ สัมพันธ์พานิช. (2558). เทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนด้วยพืช: *Phytoremediation*. ประเทศไทย: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2555). แสงซินโครตรอน. Retrieved from <https://www.slri.or.th/th/what-is-synchrotron-light.html>



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	เอกชา ตนานนท์ชัย
วัน เดือน ปี เกิด	25 กุมภาพันธ์ 2531
สถานที่เกิด	จังหวัดฉะเชิงเทรา
วุฒิการศึกษา	- วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง - วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (นานาชาติ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 88/71 ซอยกรุงธนบุรี 1 ถนนกรุงธนบุรี แขวงคลองตันใต้ เขต คลองสาน กรุงเทพมหานคร 10600
ผลงานตีพิมพ์	1) ผลงานตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ 1.1) Aekkacha Tananonchai, Pantawat Sampanpanish, Penradee Chanpiwat, Somchai Tancharakorn, Usa Sukkha. 2019. Effect of EDTA and NTA on cadmium distribution and translocation in Pennisetum purpureum Schum cv. Mott. Environmental Science and pollution Research. 26(10): 9851-9860. https://doi.org/10.1007/s11356-018-04103-z . SCOPUS Q1, IF 2.80 1.2) Aekkacha Tananonchai, Pantawat Sampanpanish. 2018. Phytotolerance, Phytotoxicity and Phytoremediation of Cd and EDTA mixtures with Napier Grass. EnvironmentAsia. 11(1): 157-167. SCOPUS Q3 2) การนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 2.1) Pantawat Sampanpanish, Rewadee Srinuykong, Aekkacha Tananonchai. 2019. Effect of Chemical Fertilizer on Arsenic Using Phytotechnology in Tailing Storage Facility from Gold Mining. IN Proceeding the IRES- 534th International Conference on Science, Technology and Management (ICSTM), Seoul, South Korea 4th - 5th January, 2019.

2.2) Aekkacha Tananonchai and Pantawat Sampanpanish. 2017. Phytotolerance, Phytotoxicity on Phytoremediation and Relative Growth Rate Using Cd and EDTA. IN The 29th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology and International Conference. November 23-25, 2017 Swissôtel Le Concorde, Bangkok, Thailand.

3) การฝึกอบรม

3.1) ได้เข้าร่วมการฝึกอบรม The ASEAN Workshop on X-ray Fluorescence (AWXRF2018): Application on plants and Agriculture ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน องค์การมหาชน จ.นครราชสีมา ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2561

3.2) ได้เข้าร่วมการประชุมวิชาการ 24th Users' Meeting & Workshops ที่ National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC) ประเทศไต้หวัน ระหว่างวันที่ 11-13 กันยายน 2561

3.3) ได้เข้าร่วมการฝึกอบรม ASEAN Workshop on X-ray Absorption Spectroscopy (AWX2015) ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน องค์การมหาชน จ.นครราชสีมา ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 8-10 มิถุนายน 2558

3.4) ได้เข้าร่วมการฝึกอบรม ASEAN Synchrotron Science Camp ครั้งที่ 4 ระหว่างวันที่ 10-14 พฤศจิกายน 2558

รางวัลที่ได้รับ

- 1) ได้รับทุนจากโครงการ Lightsources for Africa, the Americas, Asia and Middle East Project (LAAAMP) เพื่อทำวิจัยในห้องปฏิบัติการของ National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC) ประเทศไต้หวัน เป็นเวลา 2 เดือน ระหว่างวันที่ 2 กันยายน - 3 พฤศจิกายน 2561
- 2) ได้รับทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช