

ผลของกรดเอทีลินไดเอมีนเทพระอะซีติก (อีดีทีเอ) และกรดไนตริโลไทรอะซีติก (เอนทีเอ)
ต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF ETHYLENEDIAMINETETRAACETIC ACID (EDTA)
AND NITRILOTRIACETIC ACID (NTA) ON CADMIUM REMOVAL
BY HYDROPONICS WITH MOFF DWARF NAPIER GRASS
(*Pennisetum purpureum* cv. Mott)

Miss Monthira Sukcharoen



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของกรดเอทิลีนไดเอมีนเทระอะซีติก (อีดีทีเอ) และ
กรดไนตริโลไทรอะซีติก (เอนทีเอ) ต่อการกำจัดแคดเมียม
ในน้ำด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ

โดย

นางสาวมนทิรา สุขเจริญ

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร ชูตินธรานนท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.เพ็ญรติ จันทร์ภักดิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.พัฒนา อนุรักษ์พงศธร)

มนทิวรา สุขเจริญ : ผลของกรดเอทิลีนไดเอมีนเททระอะซีติก (อีดีทีเอ) และกรดไนตริโลไตรอะซีติก (เอนทีเอ) ต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ (EFFECT OF ETHYLENEDIAMINETETRAACETIC ACID (EDTA) AND NITRILOTRIACETIC ACID (NTA) ON CADMIUM REMOVAL BY HYDROPONICS WITH MOFF DWARF NAPIER GRASS (*Pennisetum purpureum* cv. Mott)) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร. พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 195 หน้า.

การศึกษาผลของกรดเอทิลีนไดเอมีนเททระอะซีติกเอซิด (EDTA) และกรดไนตริโลไตรอะซีติกเอซิด (NTA) ต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 5 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดควบคุม ไม่มีการเติมสารละลายแคดเมียม และสารซีเลต 2) ชุดควบคุม มีการเติมสารละลายแคดเมียมแต่ไม่มีการเติมสารซีเลต 3) ชุดทดลองที่เติมสารละลายแคดเมียมและสารอีดีทีเอ (Cd:EDTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 และ 1:1 โมล 4) ชุดทดลองที่เติมสารละลายแคดเมียมและสารเอนทีเอ (Cd:NTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 และ 1:1 โมล และ 5) ชุดทดลองที่เติมสารละลายแคดเมียมและสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอ (Cd:EDTA+NTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 และ 1:1 โมล และทำการเก็บตัวอย่างน้ำและพืชที่ 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน เพื่อหาปริมาณการดูดซับและสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ผลการทดลองของทุกชุดการทดลอง พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีความสามารถในการดูดซับและสะสมแคดเมียมเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 30 วัน โดยความสามารถในการสะสมแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระทั้ง 5 ชุดการทดลองในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีค่าสูงกว่าส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการสะสมของแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระทั้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ในทุกชุดการทดลองกับชุดควบคุมทั้ง 2 ชุด แล้วพบว่า ในชุดทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ เอนทีเอ และอีดีทีเอร่วมกับเอนทีเอ ทั้ง 2 อัตราส่วนมีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากกว่าในชุดควบคุม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สารซีเลตทั้ง 2 ชนิด มีส่วนช่วยในการดูดซับแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ โดยชุดทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ เอนทีเอ และอีดีทีเอร่วมกับเอนทีเอ ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 มีปริมาณการสะสมแคดเมียมสูงสุดในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) เท่ากับ 256.97, 255.25 และ 263.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนการสะสมแคดเมียมสูงสุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีค่า 889.31, 638.98 และ 596.59 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่ออัตราส่วนของการเติมอีดีทีเอ เอนทีเอ และอีดีทีเอร่วมกับเอนทีเอที่สูงขึ้นจะส่งผลให้การดูดซับแคดเมียมทั้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) สูงขึ้น โดยพบการดูดซับในส่วนใต้น้ำ (ราก) มากกว่าส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) คิดเป็น 3.46, 2.50 และ 2.27 เท่า ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่า การเติมสารอีดีทีเอนั้นมีผลต่อการดูดซับแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระมากกว่าการเติมสารเอนทีเอ และการเติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอในการกำจัดแคดเมียมในน้ำด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5687143420 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS: CADMIUM; CHELATING AGENT: HYDROPONICS; MOFF DWARF NAPIER GRASS; PHYTOREMEDIATION

MONTHIRA SUKCHAROEN: EFFECT OF ETHYLENEDIAMINETETRAACETIC ACID (EDTA) AND NITRILOTRIACETIC ACID (NTA) ON CADMIUM REMOVAL BY HYDROPONICS WITH MOFF DWARF NAPIER GRASS (*Pennisetum purpureum* cv. Mott). ADVISOR: ASSOC. PROF. DR. PANTAWAT SAMPANPANISH, 195 pp.

The effects of ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) and nitrilotriacetic acid (NTA) on cadmium removal from the synthetic contaminated water by hydroponics with Moff dwarf napier grass (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) were studied. The experimental sets can be divided into 5 groups including 1) uncontaminated water (deionized water without chelating agents), 2) contaminated water without addition of chelating agents, 3) contaminated water with EDTA addition with the Cd:EDTA ratio of 1:0.5 and 1:1 mole, 4) contaminated water with NTA addition with the Cd:NTA ratio of 1:0.5 and 1:1 mole, and 5) contaminated water with both EDTA and NTA addition with the ratio of 1:0.5 and 1:1 mole. Experimental sets 1 and 2 were considered as the control sets in this study. Plant and water samples were collected and analyzed for total Cd concentrations at 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 and 105 days. The accumulation of Cd in plant was determined in two parts of the plant which are shoot (stem and leaves) and root. The analytical results of all experimental sets showed highest Cd accumulation after 30 days of the experiment significant higher Cd accumulation in root than shoot were found. In addition, the accumulations of Cd in both shoots and roots of napier grass in all experimental sets with chelating agent were significant higher than those Cd accumulations in shoots and roots of napier grass in the control sets. When focusing at the molecular ratio of 1:1 of chelating addition, it was found that highest Cd concentrations of 256.97, 255.25 and 263.25 mg/kg dry weight were found in the shoots of napier grass collected from the experimental sets of EDTA, NTA and EDTA+NTA addition, respectively. While highest Cd accumulations in the roots of napier grass from these 3 experimental sets were 889.31, 638.98 and 596.59 mg/kg dry weight, respectively. In addition, it was found that higher amount of chelating agent addition could resulted in the higher Cd accumulation in both shoots and roots. About 3.46, 2.50 and 2.27 times of the ratio of Cd accumulation in roots and shoots were determined from the experimental sets with EDTA, NTA and EDTA+NTA addition, respectively. Therefore, it could be concluded that EDTA can enhance the translocation and accumulation of Cd in napier grass than the use of NTA and EDTA+NTA as the chelating agents.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature

Academic Year: 2016

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณา ความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวิศ สัมพันธ์พานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณามอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ และคอยไต่ถามด้วยความห่วงใยถึงความก้าวหน้าในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี พร้อมทั้งมอบข้อคิดในการดำเนินชีวิตในอนาคตหลายด้าน ตลอดจนกรุณาเสียสละเวลาเรียบเรียง และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเป็นวิทยานิพนธ์ที่สมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิมยิ้ม ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข อาจารย์ ดร.เพ็ญรติ จันทรวัดน์ และรองศาสตราจารย์ ดร.พัฒนา อนุรักษพงษ์ชรร ที่กรุณาเสียเวลาอันมีค่ายิ่งมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และข้อคิดเห็นที่มีส่วนสำคัญในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ทนุอดหนุนวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนบางส่วนในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) สำหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัย ขอขอบพระคุณกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนหน่วยปฏิบัติการวิจัยฯ และขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ในการทดลอง ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา ตำบลปากช่อง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมาที่ให้ความอนุเคราะห์ฟ่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระในการวิจัยครั้งนี้ และขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ได้อำนวยความสะดวกและสนับสนุนในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์อันเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่ออานาวา - คุณแม่สมคิด สุขเจริญ และนายพิจิตร สุขเจริญ รวมถึงญาติพี่น้องทุกคนในครอบครัว ที่ให้ความรัก ความห่วงใย คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่สำคัญแก่ข้าพเจ้าเสมอมา รวมทั้งให้การสนับสนุนเงินทุนการศึกษาในครั้งนี้ และเป็นแรงบันดาลใจที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ตามเป้าหมาย คุณประโยชน์ที่ปรากฏในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบแต่คุณพ่อ คุณแม่ อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1.1 แคดเมียม (Cadmium).....	6
2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียม.....	6
2.1.3 แหล่งที่มาของแคดเมียมที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม.....	7
2.1.4 ความเป็นพิษของแคดเมียม.....	9
2.1.5 ค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม.....	10
2.2 เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation).....	10
2.2.1 ความหมาย.....	10
2.2.2 ประเภทของเทคโนโลยีในการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation).....	11

2.2.3	พืชที่สะสมโลหะหนัก (Hyperaccumulator).....	15
2.2.4	ข้อดี และข้อจำกัดของเทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช	16
2.3	สารคีเลต (Chelating agent).....	18
2.3.1	ความหมายของสารคีเลต	18
2.3.2	ประเภทของสารคีเลต.....	19
2.3.3	สารคีเลตที่ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก	19
2.4	การปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics).....	21
2.4.1	ความหมายของการปลูกพืชไร้ดิน.....	21
2.4.2	ประเภทของการปลูกพืชไร้ดิน	21
2.4.3	ข้อดี และข้อจำกัดของการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics).....	22
2.5	หญ้าสกุลเนเปียร์.....	23
2.6	แสงซินโครตรอน (Synchrotron).....	27
2.6.1	ความหมายของแสงซินโครตรอน	27
2.6.2	วิธีการผลิตแสงซินโครตรอน	30
2.6.3	ระบบลำเลียงแสง BL6b: Micro-XRF (Micro-X-ray Fluorescence).....	31
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
2.7.1	งานวิจัยด้านการศึกษาพืชที่ปลูกแบบในดินและปลูกแบบไร้ดิน (Phytoremediation and Hydroponics)	34
2.7.2	งานวิจัยด้านการศึกษาสารคีเลตในการบำบัดโลหะหนักด้วยพืช	39
2.7.3	งานวิจัยด้านการศึกษาความเป็นพิษของพืช.....	41
2.7.4	งานวิจัยด้านการศึกษาหญ้าเนเปียร์	42
2.7.5	งานวิจัยด้านการศึกษาแสงซินโครตรอน	44
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย	48

3.1 สถานที่ดำเนินการวิจัย	48
3.2 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	48
3.2.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกพืชทดลอง	48
3.2.2 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำ และพืช	49
3.2.3 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	50
3.2.4 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ	51
3.2.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง	52
3.3 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	52
3.3.1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ เหมาะสม	52
3.3.2 การศึกษาและทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมด้วยการเติมสารคี เลตในชุดทดลอง	57
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	60
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย	62
4.1 ผลการศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ เหมาะสม	62
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำเสียสังเคราะห์	62
4.1.2 การเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระในน้ำเสียสังเคราะห์	67
4.1.3 การแสดงความเป็นพิษของแคดเมียมต่อหญ้าเนเปียร์แคระ	70
4.1.4 การสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ	73
4.1.5 ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม	80
4.2 ผลการศึกษาสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ต่อการดูดดึงแคดเมียมในน้ำเสีย สังเคราะห์	82
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำเสียสังเคราะห์	82

4.2.2 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์.....	91
4.2.3 ผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ต่อการเติบโตของพืชทดลอง.....	95
4.2.4 การแสดงความเป็นพิษของพืช (Phytotoxicity).....	100
4.2.5 อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระ (Relative growth rate; RGR).....	101
4.2.6 ผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ต่อการดูดดึงแคดเมียมในหญ้า เนเปียร์แคระ.....	103
4.2.7 ผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ต่อศักยภาพในการสะสม แคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระ (Bioconcentration factor; BCF)....	116
4.2.8 สมดุลมวล (Mass balance) และประสิทธิภาพของสารอีดีทีเอ และสารเอนทีเอต่อ การดูดดึงแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์.....	123
4.2.9 ผลของการตรวจวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ.....	126
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	130
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	130
5.1.1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ เหมาะสม.....	130
5.1.2 การศึกษาผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ต่อการดูดดึง แคดเมียม.....	131
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	132
รายการอ้างอิง.....	134
ภาคผนวก ก.....	145
ภาคผนวก ข.....	147
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	195

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียม.....	8
ตารางที่ 2.2 ค่าเกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม.....	10
ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสาร NTA.....	20
ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสาร EDTA.....	20
ตารางที่ 3.1 เกณฑ์การประเมินความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ โดยการสังเกตด้วยสายตา ภายหลังการใส่สารละลายแคดเมียม	56
ตารางที่ 4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of hydrogen ion; pH) ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	63
ตารางที่ 4.2 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	65
ตารางที่ 4.3 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential; ORP) ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	66
ตารางที่ 4.4 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid; TSS) ในน้ำเสียสังเคราะห์	68
ตารางที่ 4.5 น้ำหนักสดและเปอร์เซ็นต์การเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระ	69
ตารางที่ 4.6 การแสดงความเป็นพิษของแคดเมียมต่อหญ้าเนเปียร์แคระ (Phytotoxicity) ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	71
ตารางที่ 4.7 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ	77
ตารางที่ 4.8 ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระ (Bioconcentration factor; BCF).....	78
ตารางที่ 4.9 ปริมาณแคดเมียมที่หญ้าเนเปียร์แคระสามารถดูดซับได้ทั้งหมด	79
ตารางที่ 4.10 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of hydrogen ion: pH) ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	83
ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบผลของสารคีเลตต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้ใบ (ราก).....	114
ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบผลของสารคีเลตต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้เหนือใบ (ลำต้นและใบ).....	115

ตารางที่ 4.13 ศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระเฉลี่ยทั้งต้น (Bioconcentration factor; BCF).....	122
ตารางที่ 4.14 สมดุลมวลของแคดเมียม (Mass Balance) ในการทดลอง.....	124



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขอบเขตการศึกษา.....	4
รูปที่ 2.1 ลักษณะผลึกของแคดเมียม.....	7
รูปที่ 2.2 ประเภทของเทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation).....	14
รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของสาร (Nitriolotriacetic acid; NTA).....	19
รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของสาร (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA).....	20
รูปที่ 2.5 การปลูกพืชไร้ดิน.....	21
รูปที่ 2.6 หญ้าเนเปียร์แคระ (<i>Pennisetum purpureum</i> cv. Mott).....	25
รูปที่ 2.7 ลักษณะหญ้าเนเปียร์ในวงศ์ <i>Pennisetum</i>	26
รูปที่ 2.8 ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun).....	27
รูปที่ 2.9 เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (Linear accelerator; Linac).....	28
รูปที่ 2.10 เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (Booster synchrotron).....	28
รูปที่ 2.11 วงกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage ring).....	29
รูปที่ 2.12 ระบบลำแสง (Beamlines; BL).....	30
รูปที่ 2.13 วิธีการผลิตแสงซินโครตรอน.....	31
รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบของสถานีทดลองระบบลำแสง BL6b: Micro-XRF (Micro-X-ray Fluorescence) ณ ห้องปฏิบัติการแสงสยาม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การ มหาชน) (Synchrotron Light Research Institute (Public Organization)).....	33
รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของระบบลำแสง.....	33
รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบลำแสง BL6b: Micro-XRF.....	34
รูปที่ 3.1 สถานที่ดำเนินการวิจัย.....	49
รูปที่ 3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	50

รูปที่ 3.3 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ	52
รูปที่ 3.4 ภาพรวมในการดำเนินการทดลอง	54
รูปที่ 3.5 การวิเคราะห์การเคลื่อนย้ายแคดเมียมไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืชด้วยแสงซินโครตรอน	61
รูปที่ 4.1 การแสดงความเป็นพิษของแคดเมียมต่อหญ้าเนเปียร์แคระ	72
รูปที่ 4.2 ปริมาณแคดเมียมในส่วนได้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ (n=3)	74
รูปที่ 4.3 ปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือหน้า (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ (n=3).....	74
รูปที่ 4.4 ปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งต้นหญ้าเนเปียร์แคระ (n=3)	75
รูปที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การดูดดึงแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระ	80
รูปที่ 4.6 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม EDTA (n=3)	84
รูปที่ 4.7 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม NTA (n=3)	85
รูปที่ 4.8 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม EDTA ร่วมกับ NTA (n=3)..	85
รูปที่ 4.9 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม EDTA (n=3)	87
รูปที่ 4.10 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม NTA (n=3).....	87
รูปที่ 4.11 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม EDTA ร่วมกับ NTA (n=3)	88
รูปที่ 4.12 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม EDTA (n=3).....	89
รูปที่ 4.13 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม EDTA ร่วมกับ NTA (n=3)	89
รูปที่ 4.14 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม NTA (n=3).....	90
รูปที่ 4.15 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3)	93

รูปที่ 4.16 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) (n=3)	93
รูปที่ 4.17 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับ สารเอนทีเอ (EDTA+NTA) (n=3).....	94
รูปที่ 4.18 น้ำหนักแห้งในส่วนได้น้ำ (ราก) ของชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3)	97
รูปที่ 4.19 น้ำหนักแห้งในส่วนได้น้ำ (ราก) ของชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) (n=3).....	97
รูปที่ 4.20 น้ำหนักแห้งในส่วนได้น้ำ (ราก) ของชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอ (EDTA+NTA) (n=3)	98
รูปที่ 4.21 น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของ ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3)	98
รูปที่ 4.22 น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของชุดการทดลองที่เติม สารเอนทีเอ (NTA) (n=3)	99
รูปที่ 4.23 น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของชุดการทดลองที่เติม สารอีดีทีเอ ร่วมกับสารเอนทีเอ (EDTA+NTA) (n=3)	99
รูปที่ 4.24 การแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคะที่ระยะเวลาต่าง ๆ.....	101
รูปที่ 4.25 อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคะที่ระยะเวลาต่าง ๆ	102
รูปที่ 4.26 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนได้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะ ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3)	104
รูปที่ 4.27 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคะ ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3)	105
รูปที่ 4.28 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนได้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะ ในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) (n=3).....	107
รูปที่ 4.29 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคะ ในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) (n=3).....	108
รูปที่ 4.30 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนได้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะ ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA) (n=3).....	110

รูปที่ 4.31 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเนื้อน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3).....	110
รูปที่ 4.32 กลไกของการดูดตั้งสารโลหะหนักด้วยพีช	113
รูปที่ 4.33 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3).....	119
รูปที่ 4.34 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเนื้อน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3).....	119
รูปที่ 4.35 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) (n=3).....	120
รูปที่ 4.36 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเนื้อน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) (n=3).....	120
รูปที่ 4.37 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA) (n=3).....	121
รูปที่ 4.38 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเนื้อน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ NTA (n=3).....	121
รูปที่ 4.39 ประสิทธิภาพการดูดตั้งแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลอง.....	125

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำของประเทศไทยนั้นอยู่ในภาวะวิกฤติหลายพื้นที่ ทั้งนี้เนื่องมาจากการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะกิจกรรมการทำเหมืองที่เกิดจากกระบวนการผลิตและการทิ้งของเสียอันตรายที่ไม่ได้รับการจัดการที่ถูกต้อง รวมทั้งกิจกรรมทางการเกษตรที่มีการเปิดหน้าดินเพื่อการเพาะปลูก ทำให้โลหะหนักมีการแพร่กระจายลงสู่สิ่งแวดล้อม เกิดปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในแหล่งน้ำซึ่งมักมีผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและมีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในแหล่งน้ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนที่ใช้น้ำจากแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก อาทิ การปนเปื้อนแคดเมียม ตะกั่ว และสารหนู เป็นต้น หากไม่ได้รับการบำบัดอย่างถูกวิธีแล้ว อาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนและมีความเป็นพิษสูงเป็นอันตรายต่อมนุษย์ พืชและสัตว์เป็นอย่างยิ่ง ตลอดจนส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและเกิดการสะสมโลหะหนักในห่วงโซ่อาหาร

จากการวิจัยของสถาบันจัดการทรัพยากรน้ำนานาชาติ (International Water Management Institute; IWMI) ร่วมกับกรมวิชาการเกษตรได้ทำการศึกษาปัญหาการปนเปื้อนโลหะที่สำคัญระดับประเทศ จากกรณีปัญหาตัวอย่างการปนเปื้อนโลหะแคดเมียมในลำห้วยแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยได้ทำการสำรวจสภาพพื้นที่และเก็บตัวอย่างคุณภาพสิ่งแวดล้อม และพบการปนเปื้อนแคดเมียมในแหล่งน้ำสูงถึง 0.3-0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่, 2549) โดยมีสาเหตุมาจากกระบวนการผุพังสลายตัวตามธรรมชาติทางธรณีวิทยาของพื้นที่ และกิจกรรมจากมนุษย์เป็นสำคัญ อีกทั้งมีการตรวจสอบพบปริมาณแคดเมียมปนเปื้อนสูงผิดปกติในลำห้วยแม่ตาวอันเกิดจากการรองรับน้ำล้นจากกิจกรรมเหมืองแร่ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชาชนที่นำน้ำไปใช้ในการอุปโภคบริโภค รวมทั้งเกษตรกรร่อนน้ำจากลำห้วยแม่ตาวมาใช้ในการเพาะปลูก จากปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักที่เกิดขึ้นดังกล่าวซึ่งควรได้รับการแก้ไขอย่างถูกต้องและเหมาะสม ซึ่งทางเลือกหนึ่ง คือ การใช้พืชในการบำบัดกำจัดโลหะหนักเพื่อลดอันตรายหรือความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม กลไกของพืชที่ใช้ในการกำจัดสารโลหะหนักต่าง ๆ จากการดูดดึงโลหะหนักโดยรากพืช และการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืช จึงเป็นวิธีที่ประหยัดต้นทุนในการบำบัดสารโลหะหนัก โดยไม่จำเป็นต้องใช้ต้นทุนในการบำบัดสูงอย่างวิธีการอื่น ๆ เช่น การขุดลอกดินปนเปื้อนไปบำบัดหรือใช้วิธีการชะล้างดิน (Soil

washing) และการใช้สารเคมีในการบำบัด เป็นต้น อีกทั้งการบำบัดโลหะหนักด้วยพืชยังเป็นเทคโนโลยีที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีก (USEPA, 2000)

การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงได้นำเทคโนโลยีการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยพืช (Phytoremediation) และด้วยวิธีการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics) มาใช้ในการกำจัดแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) เป็นตัวกลางในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งหญ้าเนเปียร์แคระนั้นเป็นพืชชีวมวล (Biomass) ที่กำลังได้รับความสนใจในการผลิตพลังงานทดแทน (Renewable energy) เนื่องจากมีต้นทุนในการปลูกต่ำ ให้ผลผลิตต่อไร่สูง ดูแลรักษาง่าย และเจริญเติบโตเร็ว อีกทั้งงานวิจัยครั้งนี้สามารถนำพืชมาช่วยแก้ไขปัญหาโลหะหนักที่ตกค้างหรือปนเปื้อนในน้ำร่วมกับการใช้สารคีเลต (Chelating agent) ซึ่งเป็นการศึกษาความสามารถของสาร EDTA และสาร NTA ร่วมด้วยเพื่อช่วยในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ให้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น จากผลการศึกษาที่ได้ในครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่จริงที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกแบบไร้ดิน (Hydroponics)

1.2.2 เพื่อศึกษาความสามารถของสารคีเลตที่ใช้ คือ กรดเอทิลีนไดเอมีนเทตระอะซีติกเอซิด (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA) และกรดไนโตรโลไตรอะซีติกเอซิด (Nitritotriacetic acid; NTA) ในการดูดซับแคดเมียม

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารคีเลตที่ใช้ในการช่วยดูดซับแคดเมียมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 หญ้าเนเปียร์แคระมีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ และสามารถสะสมไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืชได้ในระดับที่แตกต่างกัน

1.3.2 การเติมสารคีเลต EDTA ร่วมกับสาร NTA มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระได้มากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และไม่ส่งผลต่อการแสดงความเป็นพิษของพืช

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้ เป็นการศึกษาศักยภาพของหญ้าเนเปียร์แคระในการดูดซับแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารละลายแคดเมียมปนเปื้อน และมีการใช้สารคีเลตช่วยในการดูดซับแคดเมียมไปสะสมไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืช ขอบเขตการวิจัยสามารถแสดงได้ในรูปที่ 1.1 และมีรายละเอียดขอบเขตการวิจัยดังต่อไปนี้

1.4.1 พืชที่ใช้ในการศึกษา คือ หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) นำมาจากศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา ตำบลปากช่อง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

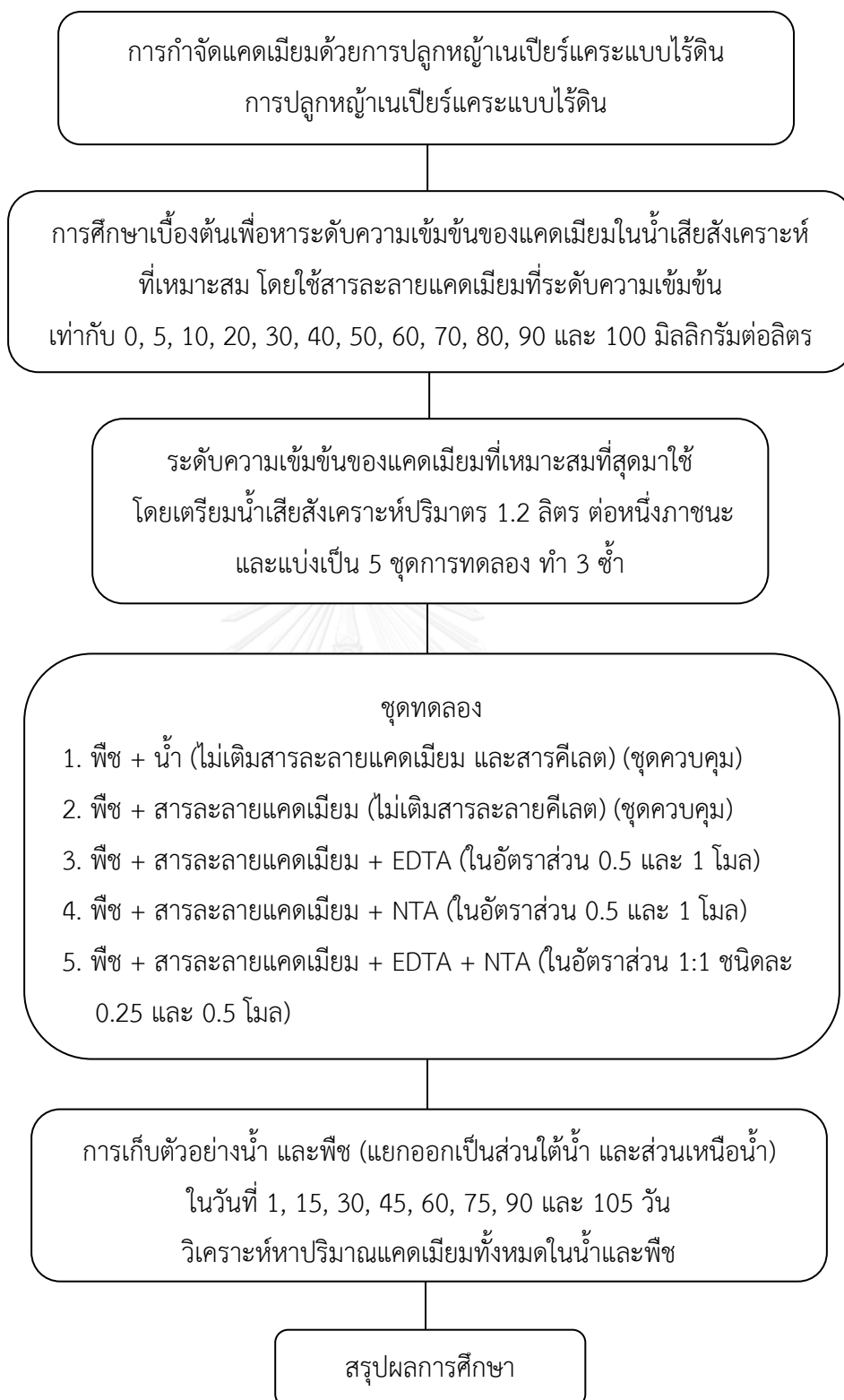
1.4.2 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งได้มาจากการละลายสารประกอบแคดเมียมในเตรทเทรทไฮเดรท ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ใช้ศึกษาเท่ากับ 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm)

1.4.3 สารคีเลตที่ใช้ในการศึกษามี 2 ชนิด คือ กรดเอทิลีนไดเอมีนเททระอะซีติกเอซิด (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA) และกรดไนโตรโลไตรอะซีติกเอซิด (Nitrilotriacetic acid; NTA) ความเข้มข้นของสารคีเลตที่ใช้ศึกษาเท่ากับ 0.5 และ 1 โมล

1.4.4 การดำเนินการทดลองนั้นได้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม และ 2) การศึกษาและทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมด้วยการเติมสารคีเลตในชุดทดลอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม ซึ่งใช้ระยะเวลาในการศึกษา 30 วัน โดยมีการตรวจวัดคุณภาพน้ำ การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของพืชทางด้านน้ำหนัก และการแสดงความเป็นพิษของพืช ในวันที่ 1, 7, 15, 22 และ 30 วันของการทดลอง และเก็บตัวอย่างน้ำและพืชไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

2) การศึกษาและทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมด้วยการเติมสารคีเลตในชุดทดลอง โดยมีการตรวจวัดคุณภาพน้ำ การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของพืชทางด้านน้ำหนัก และเก็บตัวอย่างน้ำและพืชไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดที่ระยะเวลาของการทดลอง ในวันที่ 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขอบเขตการศึกษา

1.4.5 การเก็บตัวอย่างน้ำและการเก็บตัวอย่างพืชทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด ได้ทำการเก็บตามระยะเวลาของการทดลอง โดยแยกพืชออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)

1.4.6 การดำเนินการทดลองได้ปฏิบัติในเรือนเพาะชำ ชั้น 2 และห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ชั้น 3 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และการวิเคราะห์ด้วยระบบแสงซินโครตรอน (Synchrotron) โดยนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) (Synchrotron Light Research Institute (Public Organization)) ตั้งอยู่ภายในบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีวิทยา จังหวัดนครราชสีมา

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงประสิทธิภาพและความสามารถของหญ้าเนเปียร์แคระในการดูดซับ และการสะสมแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อน

1.5.2 ทราบถึงความสามารถในความทนทานของพืช ระยะเวลาในการดูดซับ และการสะสมแคดเมียมได้สูงสุดของหญ้าเนเปียร์แคระ

1.5.3 ทราบผลของการใช้สารคีเลต 2 ชนิด คือ กรดเอทิลีนไดเอมีนเทตระอะซีติกเอซิด (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA) และกรดไนตริโลไตรอะซีติกเอซิด (Nitrilotriacetic acid; NTA) ที่มีต่อการช่วยดูดซับแคดเมียมเข้าสู่พืชศึกษา

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 แคดเมียม (Cadmium)

แคดเมียมถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1817 โดย Friedrich Strohmeyer นักเคมีชาวเยอรมัน ได้ตั้งชื่อในภาษาลาตินว่า Cadmia และในภาษากรีกตั้งชื่อว่า Kadmeia ซึ่งชื่อนี้ได้มาจากคำว่า Calamine (Zinc carbonate) เป็นการแยกออกไซด์ของธาตุนี้ที่อยู่ปะปนในปริมาณเล็กน้อยกับสังกะสีคาร์บอเนต ($ZnCO_3$) โดยทำให้ตกตะกอนออกมาด้วยไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แล้วรีดิวซ์ต่อไปเป็นโลหะอิสระ (Steve, 2007) แคดเมียมเป็นธาตุที่มีอยู่น้อยในธรรมชาติ ส่วนมากมักปนอยู่กับแร่สังกะสี ทองแดง และดีบุก ปกติในธรรมชาติแคดเมียมจะรวมตัวกับกำมะถันเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ (Greenockite, CdS) (Kabata-Pendias และ Pendias, 2000) ในทางอุตสาหกรรมแคดเมียมมีความสำคัญและมีประโยชน์หลายประการ เช่น ถูกใช้เป็นส่วนผสมของอัลลอยด์เพื่อเพิ่มความเหนียว และเนื่องจากแคดเมียมมีคุณสมบัติทนทานต่อการสึกกร่อนในผลิตภัณฑ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้เป็นอย่างดี จึงนำไปฉาบผิวโลหะต่าง ๆ เช่น เหล็ก เหล็กกล้า ทองแดง และนำไปชุบโลหะเพื่อนำไปเป็นส่วนประกอบในเครื่องใช้ไฟฟ้า อุตสาหกรรมเครื่องบิน และรถยนต์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่ชนิดที่เติมประจุใหม่ได้ ใช้เป็นสารคงตัวที่ทำให้พลาสติกชนิดโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) อยู่ตัว ใช้เป็นส่วนผสมของอมัลกัม (Amalgam) ทำวัสดุอุดฟัน ใช้ในกระบวนการแกะสลักแม่พิมพ์ และกระบวนการเชื่อมหรือประสานโลหะ (สุรภี ไรจน์อารยานนท์, 2532)

2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียม

แคดเมียม (Cadmium; Cd) มีอนุกรมทางเคมีเป็นโลหะทรานซิชัน ซึ่งเป็นธาตุที่จัดอยู่ในหมู่ IIB ในตารางธาตุพีริออดิก (Periodic table of elements) เป็นโลหะหนักที่มีผลึกสีเทาเงิน เป็นธาตุที่มีพิษ และมีสถานะเป็นของแข็ง ดังรูปที่ 2.1 มีเลขอะตอม (Atomic number) เท่ากับ 48 มีมวลอะตอม (Atomic mass) เท่ากับ 112.411 กรัม/โมล มีเลขออกซิเดชัน (Oxidation number) เท่ากับ +2 (ออกไซด์เป็นเบสปานกลาง) มีความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) เท่ากับ 8.642 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดเดือด (Boiling point) เท่ากับ 767 องศาเซลเซียส มีจุดหลอมละลาย (Melting point) เท่ากับ 321 องศาเซลเซียส มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Hexagonal มีลักษณะเป็นรูปแท่ง แผ่น เส้นลวด หรือเป็นผงเม็ดเล็ก ๆ แคดเมียมเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเบา เนื้ออ่อน สามารถดัดงอได้ง่าย ถูกตัดได้ง่ายด้วยมีด และทนทานต่อการสึกกร่อน (Traina, 1999) ในธรรมชาติเมื่อ

อากาศมีความชื้นสูงแคดเมียมสามารถถูกออกซิไดซ์ (Oxidize) ได้อย่างช้า ๆ ไปเป็นแคดเมียมออกไซด์ (Cadmium oxide; CdO) แคดเมียมเป็นธาตุที่ไม่ละลายในน้ำ แต่สามารถละลายได้ดีในกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid: HCl) กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid: H₂SO₄) กรดไนตริก (Nitric acid: HNO₃) และแอมโมเนียมไนเตรท (Ammonium nitrate: NH₄NO₃) ที่อุณหภูมิสูง แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับเบส (Domy, 2001) คุณสมบัติของแคดเมียม แสดงได้ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะผลึกของแคดเมียม

ที่มา: <http://elcorso.es/reportaje-los-imprescindibles-metales-raros>

2.1.3 แหล่งที่มาของแคดเมียมที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม

แคดเมียมเป็นโลหะหนัก (Heavy metal) ที่มีความเป็นพิษสูง อันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิต หากไม่ได้รับการจัดการและควบคุมอย่างถูกต้องสามารถปนเปื้อนและตกค้างสู่สิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นสามารถแบ่งแหล่งที่มาของแคดเมียมที่เป็นสาเหตุของการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ (James, 1999) ดังต่อไปนี้

1) จากธรรมชาติ

แคดเมียมเป็นธาตุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติที่มีการกระจายตัวอยู่ในเปลือกโลก มีความเข้มข้นเฉลี่ยประมาณ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (World Health Organization, 1992; Alloway, 1995) ซึ่งในธรรมชาติพบอยู่ร่วมกับแร่สังกะสี ในรูปของสังกะสีซัลไฟด์ (Zinc sulfide; ZnS) โดยทั่วไปแคดเมียมไม่พบในรูปของโลหะบริสุทธิ์ (Pure state) มักพบในรูปต่าง ๆ เช่น แคดเมียมซัลเฟต (Cadmium sulfate; CdSO₄) แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide; Cds) แคดเมียมคลอไรด์ (Cadmium chloride; CdCl₂) และแคดเมียมออกไซด์ (Cadmium oxide; CdO)

(Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1999) กระบวนการทางธรรมชาติที่มีผลทำให้เกิดการเคลื่อนย้าย (Translocation) แคดเมียมไปสู่สิ่งแวดล้อม ได้แก่ การผุพังของหิน (Weathering) และการกัดกร่อนของดิน (Erosion)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียม

คุณสมบัติ	รายละเอียด
สูตรทางเคมี	Cd
เลขอะตอม	48
สถานะ	ของแข็ง
มวลอะตอม	112.411 กรัม/โมล
เลขออกซิเดชัน	+2 (ออกไซด์เป็นเบสปานกลาง)
ความถ่วงจำเพาะ	8.642 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดเดือด	765 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	321 องศาเซลเซียส
โครงสร้างผลึก	Hexagonal
การออกซิไดซ์	ในธรรมชาติเมื่ออากาศมีความชื้นสูงแคดเมียมสามารถถูกออกซิไดซ์ (Oxidize) ได้อย่างช้า ๆ ไปเป็นแคดเมียมออกไซด์ (Cadmium oxide; CdO)
การละลาย	ไม่ละลายในน้ำ แต่สามารถละลายได้ดีในกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid: HCl) กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid; H ₂ SO ₄) กรดไนตริก (Nitric acid; HNO ₃) และแอมโมเนียมไนเตรท (Ammonium nitrate; NH ₂ NO ₃) ที่อุณหภูมิสูง

ที่มา: ดัดแปลงจาก กรมควบคุมมลพิษ (2541)

2) จากการใช้ปุ๋ยในการเกษตรกรรม

การใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในการเกษตรกรรม เช่น ปุ๋ยจากหินฟอสเฟต ซึ่งหินฟอสเฟตนั้นเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณรวมของธาตุฟอสฟอรัสสูง และราคาถูก เนื่องจากเป็นผลพลอยได้จากการทำเหมืองแร่ในการผลิตปุ๋ยอนินทรีย์ที่มาจากรธรรมชาติ แต่ปุ๋ยชนิดนี้ส่วนใหญ่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ยาก พืชไม่สามารถดูดซึมได้ ดังนั้นจึงจัดเป็นปุ๋ยที่มีประสิทธิภาพต่ำ และยังเสี่ยงต่อการปนเปื้อนจากธาตุโลหะอื่น ๆ จากหินฟอสเฟตด้วย เช่น แคดเมียม และตะกั่ว

3) จากเหมืองแร่ และการถลุงแร่

แคดเมียมเป็นโลหะที่เป็นผลพลอยได้ (By product) จากการทำเหมืองแร่ และถลุงแร่สังกะสี มลพิษในกระบวนการผลิตเกิดขึ้นทุกขั้นตอนตั้งแต่ขั้นตอนการขุดหาแร่ธาตุ การขนส่งจากเหมืองแร่ไปสู่โรงงานถลุง เป็นต้น เมื่อหน้าดินถูกขุดลอกออกไปในการทำเหมือง อาจถูกชะล้างโดยการพัดพาไปโดยกระแสลมทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง และปัญหาสภาพแวดล้อมอีกประการหนึ่งที่เกิดจากการทำเหมืองประเภทนี้ก็คือ การระบายโลหะหนักออกจากเหมืองแร่ เมื่อเกิดการซึมลงไปเหมืองหรือบริเวณขี้แร่ก็จะละลายพวกโลหะหนักให้เป็นสารละลายไหลไปตามแม่น้ำลำธารบริเวณใกล้เคียง ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ แม้ว่าการทำเหมืองจะใช้พื้นที่บนพื้นดินเป็นบริเวณไม่กว้างนัก แต่กลับส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมในพื้นที่ใกล้เคียงทั้งบนดิน ในอากาศ และในน้ำ ถ้าหากไม่มีการจัดการที่ดีฝงฝุ่นละออง และโลหะมีพิษจะปนเปื้อนไปในสิ่งแวดล้อมทั้งบนดิน และใต้ดิน

4) จากอุตสาหกรรม

ในทางอุตสาหกรรมการปนเปื้อนแคดเมียมมีหลายสาเหตุ เช่น อุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าซึ่งมักมีการปล่อยฝุ่นละออง น้ำเสีย และกากตะกอนที่มีแคดเมียมปะปนออกมาด้วย ตลอดจนอุตสาหกรรมตะกั่ว และสังกะสีในขั้นตอนของการหลอม และถลุงแร่ เป็นต้น รวมทั้งอุตสาหกรรมชุบโลหะแคดเมียม และอุตสาหกรรมทุกประเภทที่มีการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง

2.1.4 ความเป็นพิษของแคดเมียม

ลักษณะความเป็นพิษของแคดเมียม สามารถจำแนกเป็น 2 ประเภท (กรมควบคุมมลพิษ, 2541; ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) คือ

1) ความเป็นพิษเฉียบพลัน

จากการหายใจเอาฝุ่นละอองไอแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายแล้วมีอาการภายหลังสัมผัส 2-3 ชั่วโมง โดยมีอาการไอ เจ็บหน้าอก เหนื่อยออก หนาวสั่นคล้ายอาการติดเชื้อทั่วไป มีอาการระคายเคืองอย่างแรงในปอด หายใจลำบาก ไอ และอ่อนเพลีย

2) ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง

ผลกระทบต่อทางเดินหายใจ ไตถูกทำลาย มีโปรตีนในปัสสาวะ ร่างกายขับกรดอะมิโน กลูโคส แคลเซียม และฟอสเฟตในปัสสาวะมากขึ้น ทำให้เกิดเป็นนิ่วในปัสสาวะได้

การสะสมของสารแคดเมียมในร่างกาย ทำให้เกิดโรคอิไต-อิไต (Itai-Itai) ที่เคยเกิดขึ้นในประเทศญี่ปุ่นในปี พ.ศ. 2463 โดยเกิดการระบาดของโรคตามริมฝั่งของแม่น้ำจินตชู จากการทำ

เหมืองและถลุงโลหะของบริษัทผลิตขุขี้ ที่ผลิตโลหะทองแดง ตะกั่วและสังกะสี โดยได้นำกากโลหะจากโรงงานมาทิ้งลงแม่น้ำเป็นเวลานาน จนชาวบ้านที่อาศัยในแถบนั้นเกิดอาการปวดกระดูกตามร่องซี่โครง และสันหลัง ซึ่งส่วนมากเป็นเพศหญิง โดยเฉพาะหญิงที่มีบุตรหลายคน และวัยหมดประจำเดือน ทำให้มีคนเสียชีวิต 100 กว่าราย และมากกว่า 180 ราย มีอาการถึงปัจจุบัน โดยมีสาเหตุมาจากแคดเมียมเป็นพิษ ซึ่งต่อมามีการค้นพบว่า สาเหตุมาจากการบริโภคข้าวที่ปนเปื้อนสารแคดเมียมเป็นเวลานาน 30 ปีขึ้นไป

2.1.5 ค่ามาตรฐานของการปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

จากกรณีปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดจากการปนเปื้อนแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อม จึงมีการกำหนดค่าเกณฑ์มาตรฐานสูงสุดที่ยอมให้มีปริมาณแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าเกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

ตัวกลาง	เกณฑ์อนุโลมสูงสุด
น้ำดื่มในภาชนะบรรจุสนิห	0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำบาดาลเพื่อใช้ในการบริโภค	0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม	0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
น้ำผิวดิน	0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร
ดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัย และการเกษตรกรรม	37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัย และการเกษตรกรรม	810 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ที่มา: ดัดแปลงจากกรมควบคุมมลพิษ (2541); กระทรวงอุตสาหกรรม (2521)

2.2 เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)

2.2.1 ความหมาย

เทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation) มาจากรากศัพท์คำว่า “Phyton” ในภาษากรีกที่หมายถึง “พืช” รวมกับคำว่า “Remediare” ในภาษาลาตินที่หมายถึง “การบำบัดหรือการรักษา” ซึ่งเมื่อนำทั้งสองคำนี้มารวมกัน หมายถึง เทคโนโลยีในการนำพืชมาใช้ในการบำบัดดิน โคลน กากตะกอน หรือน้ำ ที่เกิดการปนเปื้อนโดยสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ซึ่งการบำบัดนี้อาศัยประโยชน์จากกระบวนการดูดน้ำ และแร่ธาตุอาหารผ่านทางรากของพืช และกระบวนการคายน้ำออกทางใบของพืชในการเปลี่ยนสารปนเปื้อนให้อยู่ในรูปที่ไม่มีความเป็นพิษ หรือมีความเป็นพิษลดลง (USEPA, 2000)

2.2.2 ประเภทของเทคโนโลยีในการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)

การบำบัดโดยพืชมีหลายชนิดซึ่งสามารถแบ่งตามกลไกของพืชที่ใช้ในการบำบัดสารพิษต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม ได้ดังต่อไปนี้ (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558)

1) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) หรือการสะสมสารมลพิษในพืช (Phytoaccumulation)

Phytoextraction หรือเรียกอีกอย่างว่า Phytoaccumulation เป็นการใช้พืชที่มีความสามารถในการเคลื่อนย้ายและดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนจากดินโดยรากพืชดูดดึง และเคลื่อนย้ายไปสะสมยังส่วนต่าง ๆ ของพืชได้ (ดังรูปที่ 2.2 ก) (Ensley และคณะ, 2000) โดยพืชชนิดนั้นต้องเป็นพืชกลุ่มไฮเปอร์แอคคิวมิวเลเตอร์ (Hyperaccumulation) ที่สามารถสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่น ๆ โดยสามารถสะสมสารมลพิษได้ปริมาณมากถึง 100-1,000 เท่า ดังนั้นพืชที่เลือกใช้ควรเป็นพืชที่สามารถพบได้ทั่วไปในบริเวณที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก มีความทนทานต่อโลหะหนักในระดับความเข้มข้นที่สูง ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้จึงจะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ดูดดึงสารพิษต่าง ๆ ออกจากดิน และน้ำที่ปนเปื้อนได้ ซึ่งกลไกการทำงานของกระบวนการสกัดสารมลพิษด้วยพืช ประกอบด้วย 2 วิธี ดังนี้ 1) การลำเลียงสารมลพิษผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ทางรากพืช และ 2) การลำเลียงสารมลพิษผ่านตัวลำเลียงประจุบวก และการแพร่ผ่านเข้าสู่ช่องทางที่เป็นประจุบวก ซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายสารมลพิษจากส่วนของรากพืชสู่ส่วนยอดของพืช โดยอาศัยกระบวนการคายน้ำ (Kochian, 1991) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 (ก)

2) การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizofiltration)

Rhizofiltration เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการกรอง ดูดซับ และรับเอาสารปนเปื้อนต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปของสารละลายรอบ ๆ บริเวณรากให้เข้าไปในรากของพืชได้ เป็นการใช้อากของพืชหรือการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) เพื่อดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดิน น้ำ น้ำผิวดิน หรือแหล่งน้ำใต้ดิน (ดังรูปที่ 2.2 ข) ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ มีความเหมาะสมในการนำพืชไปบำบัดสารปนเปื้อนต่าง ๆ ในแหล่งน้ำ หรือในดินที่มีความชุ่มชื้นของน้ำหรือระบบไฮโดรโปนิกส์ (Hydroponics) การกรองสารมลพิษด้วยวิธีนี้ทำให้สารมลพิษที่ปนเปื้อนไม่มีการเคลื่อนที่หรือเกิดการสะสมบริเวณราก ทำให้ในส่วนของรากเท่านั้นที่มีการสะสมสารพิษ จำเป็นต้องอาศัยขั้นตอนอื่นมาบำบัดต่อไป ดังนั้นหลังการเก็บเกี่ยวส่วนของใบ และลำต้น ทำให้ไม่มีการปนเปื้อนของสารมลพิษสามารถทิ้ง หรือนำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพืชที่นำมาใช้ในการบำบัด อาทิ กรณีพืชดอกสามารถเก็บดอกไปขายได้ในช่วงระหว่างเวลาบำบัด เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 (ข)

3) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (Phytostabilization)

Phytostabilization เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการควบคุม หรือลดการเคลื่อนย้ายของสารพิษที่ปนเปื้อนในดิน และน้ำใต้ดินด้วยการตรึง และยึดไว้ที่ราก โดยรากของพืชจะดูด และตรึงสารปนเปื้อนไว้บนรากพืช ทำให้สารปนเปื้อนต่าง ๆ ภายในดินมีการเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียร เกิดการตกตะกอน ซึ่งวิธีการนี้เป็นการใช้พืชโดยเฉพาะส่วนรากในการตรึงสารมลพิษ ทำให้มีปริมาณสารมลพิษที่พืชจะดูดได้ (Bioavailability) ลดลง ในขณะที่เดียวกันก็ช่วยตรึงสารมลพิษให้อยู่กับที่ไม่ถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ หรือน้ำใต้ดิน (ดังรูปที่ 2.2 ค) โดยกระบวนการดังกล่าวนี้สามารถลดการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนที่เป็นพิษต่าง ๆ ภายในดิน และขัดขวางการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนลงไปสู่ น้ำใต้ดินให้มีการเคลื่อนย้ายลดลง พืชที่ใช้ควรมีความสามารถในการลดปริมาณการซึมผ่านของน้ำในโครงสร้างของดิน เพื่อเป็นการลดปริมาณสารมลพิษปนเปื้อนไปสู่ น้ำใต้ดิน ป้องกันการสึกกร่อนของหน้าดินและการกระจายของสารมลพิษไปยังบริเวณอื่น ๆ เช่น ดันนุ่น ดันหลิว และดันยูคาลิปตัส เป็นต้น การบำบัดโดยวิธีนี้สามารถเกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการดูดซับ (Sorption) การตกตะกอน (Precipitation) การเกิดสารเชิงซ้อน (Complexation) การรีดิวซ์เวเลนซ์โลหะ (Metal valence reduction) เป็นต้น นอกจากนี้กระบวนการ Phytostabilization ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปลูกพืชคลุมดินในบริเวณที่มีการปนเปื้อน ทำให้สารปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นสูงลดระดับความเป็นพิษให้น้อยลง ด้วยการลดความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารปนเปื้อนโดยกษัยการลม (Wind erosion) และการชะล้างสารปนเปื้อนลงสู่ น้ำใต้ดิน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 (ค)

4) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (Phytodegradation)

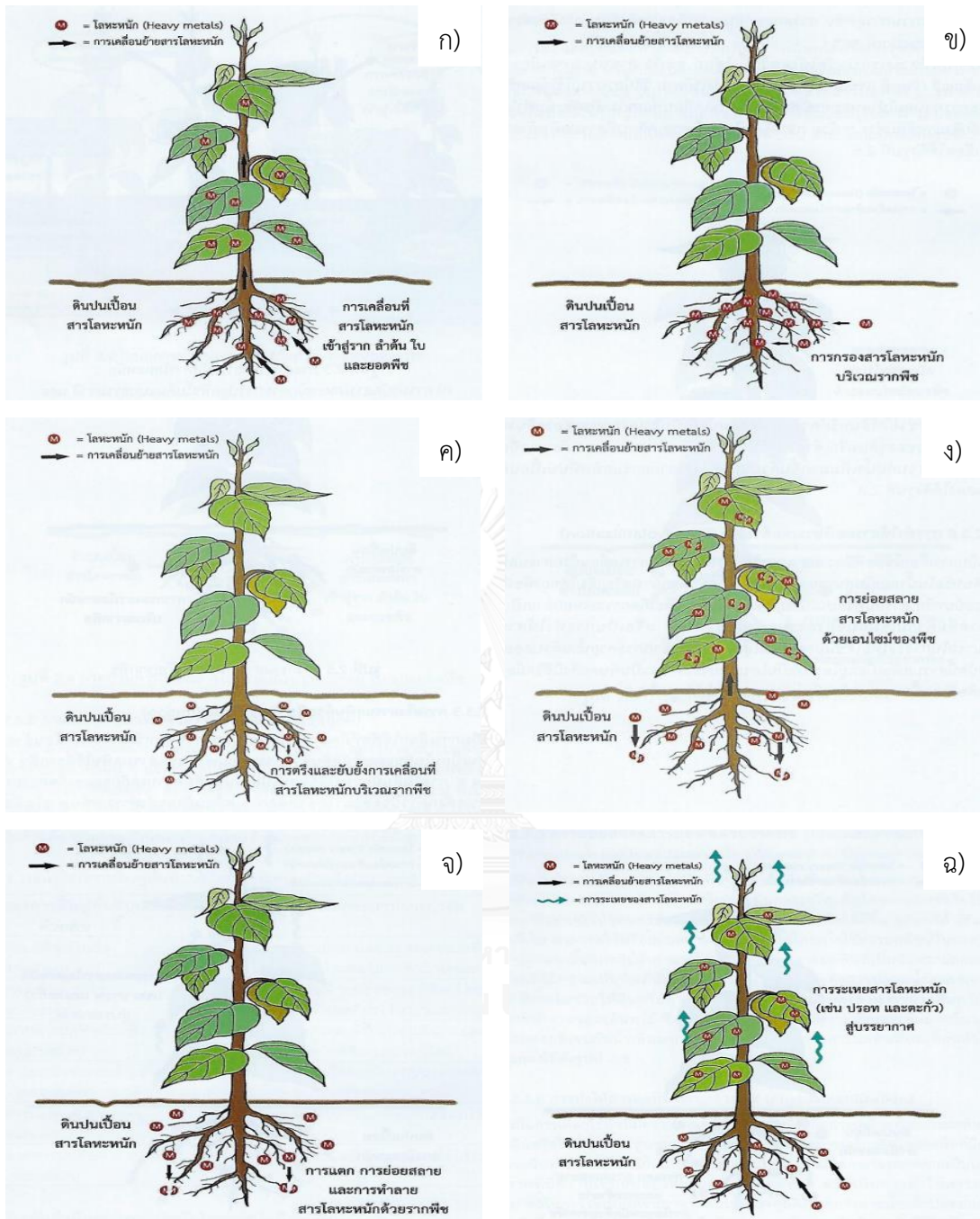
Phytodegradation สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Phytotransformation เป็นการ ใช้พืชดูดซึมสารพิษที่อยู่บริเวณรอบ ๆ รากเข้าไปเพื่อย่อยสลาย หรือเปลี่ยนแปลงด้วยเมตาบอลิซึม (Metabolism) ภายในพืชหรือจากการสร้างสารประกอบต่าง ๆ จากการใช้โปรตีน (Protein) หรือ เอนไซม์ (Enzyme) ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ภายในดิน เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ และเชื้อรา เป็นต้น ทำให้สารพิษนั้นกลายเป็นสารที่แบคทีเรียสามารถย่อยสลาย จนไม่มีอันตรายต่อการดูดซึมไปใช้ ซึ่งสารมลพิษสามารถสร้างความเสียหายแก่พืชได้โดยการดูดใช้ธาตุอาหารหรือการสะสมธาตุอาหารภายในเนื้อเยื่อของพืช สารที่ผ่านกระบวนการนี้ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ กระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นโดยกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในต้นพืชเอง โดยพืชแต่ละชนิดจะมี กลไกการกำจัดสารที่แตกต่างกัน พืชที่ใช้ในกระบวนการนี้มักเป็นพืชในตระกูลหญ้า (Poaceae) เช่น ข้าวโพด หญ้าชนิดต่าง ๆ ที่สามารถดูดซับโลหะหนักไว้ที่พื้นผิวรากพืชได้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 (ง)

5) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizodegradation)

Rhizodegradation สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Phytostimulation rhizosphere biodegradation หรือ Enhanced rhizosphere biodegradation เป็นการสลายตัวของสารที่ปนเปื้อนในดิน ด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน โดยจุลินทรีย์ เช่น ยีสต์ รา และแบคทีเรีย สามารถใช้หรือย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อเป็นอาหารของมัน รวมทั้งจุลินทรีย์ยังสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม ให้มีความเป็นพิษน้อยลง โดยเฉพาะบริเวณรากพืชมีการปล่อยของเหลว ได้แก่ เอนไซม์ น้ำตาล กรดไขมัน และกรดอะมิโน ออกมากระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์บริเวณรากพืช ซึ่งไปยับยั้งอินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon) ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ในดิน และกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ Biodegradation ซึ่งเป็นตัวช่วยทำให้ดินมีความร่วนซุยเพิ่มมากขึ้น และมีการเคลื่อนย้ายออกซิเจนกับน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย สำหรับสารมลพิษที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีนี้ ได้แก่ สารประกอบต่าง ๆ ที่ละลายในน้ำได้น้อย เช่น สารกำจัดแมลง สารกำจัดศัตรูพืชบางชนิด สารพีซีบี สารพีเอเอส และปิโตรเลียม เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 (จ)

6) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช (Phytovolatilization)

Phytovolatilization คือ การใช้พืชในการดูดซับสารมลพิษ และเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของสารมลพิษในดิน หรือในน้ำให้เป็นไอระเหยออกไปสู่บรรยากาศได้ โดยผ่านกระบวนการหายใจของพืช การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมี และการดูดซับสารมลพิษ ซึ่งเป็นการใช้พืชเพื่อบำบัดสารมลพิษโดยการใช้พืชไปดูดจับสารมลพิษ ด้วยกลไกที่เกิดขึ้นในต้นพืชเองได้ทำการแปลง (Transformation) สารมลพิษให้อยู่ในรูปที่ระเหยได้และมีความเป็นพิษลดลงจากเดิม หลังจากนั้นสารมลพิษที่อยู่ในรูปที่ระเหยได้ สามารถกำจัดออกโดยผ่านทางใบของพืช เมื่อพืชมีการดูดน้ำที่มีสารอนินทรีย์ และสารอินทรีย์ปนเปื้อนเข้าไปซึ่งเกิดขึ้นตามการเจริญเติบโตของพืช และในบางครั้งการดูดสารมลพิษดังกล่าวด้วยพืชนั้นผ่านไปยังใบ และมีการระเหยเป็นไอออกไปสู่บรรยากาศที่มีความเข้มข้นระดับต่ำ หรือเป็นการทำให้สารมลพิษระเหยขึ้นมาจากดินโดยแรงดึงจากการคายน้ำแล้วปล่อยออกทางใบของพืช ทำให้สารมลพิษที่อยู่ในรูปของไอระเหยมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตน้อยลง ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดสารปนเปื้อนที่เป็นพิษในดิน และน้ำได้เช่นกัน สารมลพิษที่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีนี้ เช่น ซีลีเนียม (Selenium) และปรอท (Mercury) เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 (ฉ)



รูปที่ 2.2 ประเภทของเทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation)

ก) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) ข) การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizofiltration)

ค) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (Phytostabilization) ง) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช

(Phytodegradation) จ) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizodegradation)

และ ฉ) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช (Phytovolatilization)

ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2558)

2.2.3 พืชที่สะสมโลหะหนัก (Hyperaccumulator)

การคัดเลือกพืชเพื่อใช้ในงานฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนนั้นเป็นหลักฐานสำคัญของการใช้พืชเพื่อฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน โดยปกติแล้วนั้นพืชทุกชนิดมีการดูดตั้งแร่ธาตุหรือโลหะหนักในปริมาณที่แตกต่างกัน และปริมาณการสะสมขึ้นอยู่กับปัจจัยภายในคือ พันธุกรรม และปัจจัยภายนอกคือ สภาพแวดล้อม นอกจากนี้พืชยังมีความแตกต่างกันในแต่ละสายพันธุ์ และชนิดของสารปนเปื้อนนั้นด้วย การนำพืชมาใช้ในเทคโนโลยีดังกล่าวนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเลือกพืชที่มีคุณสมบัติพิเศษ กล่าวคือ เป็นพืชที่มีศักยภาพในการสะสมสารมลพิษได้ดี (Hyperaccumulate plants) และทนทานต่อสารมลพิษ โดยที่พืชไม่แสดงความเป็นพิษ (Phytotoxicity) ซึ่งพืชกลุ่มไฮเพอร์แอคคิวมิวเลเตอร์เป็นพืชที่มีความสามารถในการดูดตั้งสารมลพิษสะสมไว้ในรากของพืชได้ในปริมาณสูง สามารถเคลื่อนย้ายสารมลพิษจากดิน และน้ำที่ปนเปื้อนได้ในอัตราที่สูง และพบว่า มีการสะสมอยู่ในส่วนรากพืช และส่วนที่อยู่เหนือดินของพืช ซึ่งพืชกลุ่มนี้สามารถสะสมสารมลพิษและยังมีความทนทานต่อเซลล์พืชที่ระดับความเข้มข้นของสารมลพิษที่มีปริมาณสูงกว่าปกติเมื่อเทียบกับพืชทั่วไป (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558)

Hyperaccumulator หมายถึง พืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักไว้ในปริมาณที่มากจนผิดปกติ เป็นพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักไว้ได้มากกว่าปริมาณโลหะหนักในดินที่ปลูกถึง 100-1,000 เท่า หรือเป็นพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักได้สูงกว่าพืชทั่วไป 10-500 เท่า (Hasegawa, 2002) ซึ่งพืชที่เป็น Hyperaccumulator จะมีลักษณะทั่วไปดังนี้

- 1) พืชมีความสามารถในการดูดตั้งโลหะหนักในปริมาณมากเข้าไปภายในรากของพืชได้
- 2) พืชมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากไปยังส่วนเหนือดินได้ในอัตราที่สูง
- 3) พืชมีการสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณที่สูง โดยเฉพาะที่เซลล์ของรากพืชและส่วนที่อยู่เหนือดินของพืชชนิดนั้น และพืชยังมีความสามารถและทนทานต่อความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในระดับที่สูงกว่าปกติ (Hypertolerance) ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจาก Vacuolar compartmentalization ซึ่งเป็นกระบวนการลดพิษของโลหะในพืช โดยอาศัยกลไกการขัดขวางของ Vacuole เช่น ความสามารถในการสะสมสังกะสี (Zn) ได้ในปริมาณที่สูงกว่าปกติของต้น *Thlaspi caerulescens* อันเกิดมาจากการที่สังกะสีไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ และมีการตกผลึกอยู่ในแวคิวโอล และคีเลชัน (Chelation) ซึ่งเป็นการจับตัวกับสารประกอบอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (USEPA, 1999)

การนำพืชกลุ่มไฮเพอร์แอคคิวมิวเลเตอร์มาใช้ในกระบวนการบำบัดโลหะหนักนั้น มีทั้งข้อดีและข้อจำกัด สรุปได้ดังต่อไปนี้

1) ข้อดีในการใช้พืชกลุ่มไฮเพอร์แอคคิวมิวเลเตอร์

- 1.1) มีความสะดวกในการนำไปใช้บำบัดสารมลพิษได้หลากหลายทั้งในดิน น้ำ ตะกอนท้องน้ำ อากาศ และน้ำชะกองขยะ
- 1.2) มีความสามารถในการผลิตออกซิเจน จึงไม่จำเป็นต้องเติมอากาศในการบำบัด
- 1.3) มีความหลากหลายในการแปรผล สามารถประมวลผลได้หลายค่าตามความเหมาะสมของข้อมูล เช่น อัตราการเจริญเติบโต มวลชีวภาพรวม ความสูง ปริมาณคลอโรฟิลล์ และค่าใช้จ่าย เป็นต้น
- 1.4) สามารถนำมาใช้ในการบำบัดสารมลพิษได้เกือบทุกชนิด เช่น โลหะหนัก ยาฆ่าแมลง และสารปราบศัตรูพืช เป็นต้น
- 1.5) มีต้นทุนในการดูแลรักษาต่ำ เนื่องจากการบำบัดสารมลพิษด้วยพืชนั้นเป็นการพึ่งพาสีงมีชีวิตในธรรมชาติ โดยพืชที่นำมาใช้ เช่น สาหร่าย และหญ้าชนิดต่าง ๆ เป็นต้น จึงช่วยประหยัดต้นทุนในการบำบัดได้
- 1.6) สามารถนำมาศึกษาได้หลายสถานที่ เช่น โรงเรือนทดลอง ห้องปฏิบัติการทดลอง และในพื้นที่การปนเปื้อนสารมลพิษจริง

2) ข้อจำกัดในการใช้พืชกลุ่มไฮเพอร์แอคคิวมิวเลเตอร์

- 2.1) มีความสามารถในการสะสม และทนทานต่อระดับความเข้มข้นของโลหะหนักในปริมาณสูง มักเป็นพืชที่หาได้ยาก และเจริญเติบโตอยู่ห่างไกล
- 2.2) พืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักในปริมาณที่สูงมักมีมวลชีวภาพต่ำ
- 2.3) มีการแสดงอาการความเป็นพิษของโลหะหนักคล้ายคลึงกัน ถึงแม้ว่าจะเป็นพืชต่างชนิดกัน ดังนั้นจึงเป็นการยากเมื่อเปรียบเทียบความเป็นพิษกับพืชทั่วไป
- 2.4) เมื่อนำมาใช้ในการบำบัดต้องใช้เวลายาวนาน ถึงทราบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีจากโลหะหนักของพืชได้
- 2.5) มีการนำไปประยุกต์ใช้น้อย ไม่มีเกณฑ์มาตรฐานในการบำบัดความเป็นพิษของพืช และชนิดของพืชที่ใช้ได้ยังมีจำนวนน้อย

2.2.4 ข้อดี และข้อจำกัดของเทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช

1) ข้อดีของเทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation) (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558)

1.1) Phytoremediation เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสม ในการที่จะนำมาใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่บริเวณกว้าง เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างใช้ค่าใช้จ่ายน้อยเมื่อ

เปรียบเทียบกับวิธีการบำบัดดินโดยวิธีการอื่น ๆ สาเหตุที่การทำ Phytoremediation มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าก็เนื่องมาจากอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหลัก ไม่ต้องทำการเคลื่อนย้ายดินออกจากพื้นที่ ทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ นอกจากนี้ การบำบัดโดยวิธีนี้ยังมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อย มีความปลอดภัยในการใช้มากกว่าการบำบัดโดยวิธีการอื่น ๆ อีกด้วย

1.2) Phytoremediation กับพืชที่เป็น Hyperaccumulator species นอกจากจะสามารถบำบัดโลหะหนักออกจากดินได้แล้ว ยังสามารถนำโลหะที่สกัดได้จากมวลชีวภาพไปผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่หรือนำเอาโลหะหนักที่ได้ไปขาย ถือเป็น การเพิ่มคุณค่าในการทำ Phytoextraction เนื่องจากการเผาผลาญมวลชีวภาพที่ได้จะได้พลังงานมา ซึ่งสามารถนำเอาพลังงานที่ได้นี้มาใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ กำไรที่ได้จากการขายโลหะหนักเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นต้นทุนในการปลูกพืชในครั้งต่อไปได้อีกด้วย

1.3) Phytoremediation เป็นการปลูกพืชลงในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน ซึ่งพืชที่ปลูกไปนั้นจะช่วยลดการพังทลายของดิน ช่วยป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนัก ช่วยลดการปนเปื้อนของโลหะหนักไปยังพื้นที่อื่นหรือลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งเป็นการช่วยลดความเสี่ยงในการที่โลหะหนักเหล่านี้จะเข้าสู่คนและสัตว์ได้ นอกจากนี้ พืชที่ปลูกยังสร้างสารอินทรีย์ที่มีส่วนช่วยในการพัฒนาเนื้อดิน ความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน พื้นฟูสภาพดิน และช่วยลดการชะล้างพังทลายของดินอีกด้วย รวมทั้งพืชที่นำมาใช้ในการบำบัดมีความเหมาะสมกับพื้นที่ที่ทำการบำบัดก็จะทำให้การแทรกซึมของสารอาหาร น้ำ ออกซิเจน และโลหะหนักในดินสู่พืชเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้พื้นที่บำบัดมีสภาพดีขึ้น รมรื่น ทำให้เกิดทัศนียภาพที่สวยงามแก่ผู้พบเห็น

1.4) Phytoremediation เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติสามารถประยุกต์ใช้ได้กับทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ รวมทั้งสามารถทำการบำบัดและฟื้นฟูในพื้นที่ปนเปื้อนจริงได้ และพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนเป็นบริเวณกว้างได้

1.5) พืชที่มีการสะสมของโลหะหนักเอาไว้ในปริมาณมาก ๆ จะช่วยทำให้พืชนั้นรอดพ้นจากการถูกกัดกินของแมลง เช่น หนอนผีเสื้อ ลดการเกิดโรคจากเชื้อรา และแบคทีเรีย เป็นต้น

1.6) Phytoremediation เป็นที่ยอมรับของสาธารณชน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่สะอาดปลอดภัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการบำบัดไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดที่มีความเสี่ยงต่ำ จึงมีความปลอดภัยมากกว่าวิธีการอื่น ๆ

2) ข้อจำกัดของเทคโนโลยีการบำบัดโดยใช้พืช (Phytoremediation) (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558)

2.1) Phytoremediation ไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ลึกลงไปกว่าบริเวณรากพืชได้ ซึ่งจะบำบัดได้เฉพาะส่วนที่รากไปถึงเท่านั้น นอกจากนี้ หากสารปนเปื้อนเหล่านั้นไม่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซับได้ก็จะไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารนั้น ๆ ได้เช่นกัน

2.2) Phytoremediation ถูกจำกัดไว้ด้วยสภาพทางธรณีวิทยา สภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิ ที่ตั้งของแหล่งบำบัด ความสูงจากระดับน้ำใต้ดิน และความสามารถของเครื่องมือทางเกษตรกรรม เป็นต้น

2.3) ความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อนของพืชแต่ละชนิดนั้นมีความแตกต่างกันไป ดังนั้น จึงต้องมีการศึกษาเพื่อคัดเลือกพืชที่มีความสามารถในการนำไปใช้บำบัดเป็นกรณีไป ตลอดจนไม่สามารถใช้วิธีนี้ในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนในระดับความเข้มข้นที่สูงเกินความสามารถของพืชได้ นอกจากนี้ในปัจจุบันยังขาดพืชที่มีความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อนอีกมากจึงต้องมีการศึกษาต่อไป

2.4) อัตราการเจริญเติบโตของพืช วงจรชีวิตของพืช ชนิดของโลหะหนัก และปริมาณของโลหะหนักที่ปนเปื้อนมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของพืช

2.5) Phytoremediation เป็นเทคนิคที่ขึ้นอยู่กับความสามารถของพืชและเป็นเทคนิคที่ใช้ระยะเวลาไม่จึงเหมาะสมกับการนำไปใช้แก้ปัญหาการปนเปื้อนที่ต้องการแก้ไขในเวลาอันสั้นได้ เนื่องจากต้องปลูกพืชซ้ำหลาย ๆ ครั้ง เพื่อลดปริมาณสารมลพิษในดิน เพื่อให้ระดับการปนเปื้อนเหลือเท่ากับค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ว่าไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะมนุษย์หรือสัตว์ ตลอดจนคุณภาพสิ่งแวดล้อม

2.3 สารคีเลต (Chelating agent)

2.3.1 ความหมายของสารคีเลต

สารคีเลต (Chelating agent) คือ สารอินทรีย์เคมีซึ่งสามารถรวมตัวกัน และค้ำกันพวกแคตไอออนบางชนิด รวมทั้งจุลธาตุอาหาร และอนินทรีย์สารที่เป็นบวกไม่ให้เกิดการตกตะกอน ปฏิกิริยาการรวมตัวนี้เรียกว่า Chelation และผลที่ได้จากปฏิกิริยา คือ สารคีเลตจะเข้าไปห้อมล้อมแคตไอออนของธาตุที่เป็นโลหะ (Metallic cation) เข้าไว้จนไม่เปิดโอกาสให้อนุภาคอื่น ๆ เข้าไปเกาะกับโลหะธาตุที่เป็นประจุบวกได้ และทำให้โลหะธาตุที่เป็นองค์ประกอบของคีเลตอยู่ในสารละลายที่มี pH สูงกว่า เมื่อโลหะธาตุเหล่านั้นเป็นแคตไอออนอยู่ในสภาพของสารละลายธรรมดา กล่าวคือ โลหะธาตุในโครงสร้างของสารคีเลตจะเกิดการตกตะกอนเป็นไฮดรอกไซด์ของโลหะได้ยากขึ้น จึงทำให้พืชสามารถดูดซับไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น (Salt และคณะ, 1998)

2.3.2 ประเภทของสารคีเลต

1) สารคีเลตอินทรีย์ธรรมชาติ เช่น เอทิลีนไดเอมีนดิสซัคซิเนต (Ethylenediamine disuccinate; EDDS) และไนตรีโลไทรอะซีติก (Nitrilotriacetic acid; NTA) โดยมีการแบ่งสารอินทรีย์ธรรมชาติจากสารกลุ่ม Natural low molecular weight organic acid (NLMWOA) ได้แก่ กรดฟีโนลิก (Phenolic acid; FA) กรดซิตริก (Citric acid; CA) กรดมาลิก (Malic acid; MA) กรดอะมิโน (Amino acid; AA) กรดฮิวมิก (Humic acid; HA) และกรดฟูลวิก (Fulvic acid; FA) เป็นต้น

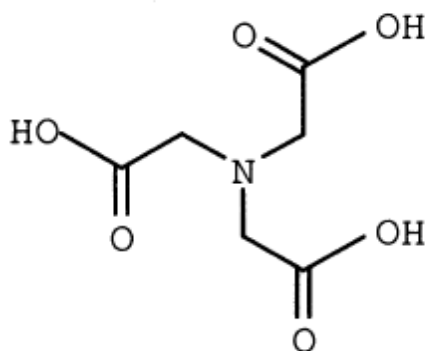
2) สารคีเลตสังเคราะห์ เช่น เอทิลีนไดเอมีนเทตระอะซีติก (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA) ไฮดรอกซีเอทิลีนไดเอมีนไทรอะซีติก (*N*-(2-Hydroxyethyl)-ethylenediaminetriacetic acid; HEDTA) ไดเอทิลีนไทรอะมิโนเพนทาอะซีติก (Diethylenetriaminepentaacetic acid; DTPA) และเอทิลีนไกลคอลเทตระอะซีติก (Ethyleneglycoltetraacetic acid; EGTA) เป็นต้น

2.3.3 สารคีเลตที่ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก

สารคีเลตที่เลือกใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้คำนึงถึงสารที่มีความเป็นพิษ และอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ สามารถหาได้ง่าย และมีราคาเหมาะสมในการลงทุน เพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดพื้นที่ที่เกิดการปนเปื้อนได้จริง ซึ่งสารคีเลตที่เลือกนำมาใช้นั้น ได้แก่ สาร NTA เป็นสารอินทรีย์ธรรมชาติ และสาร EDTA เป็นสารคีเลตสังเคราะห์ โดยมีรายละเอียดต่อไปนี้

1) ไนตรีโลไทรอะซีติก (Nitrilotriacetic acid; NTA)

ไนตรีโลไทรอะซีติก (Nitrilotriacetic acid; NTA) หรือสาร NTA เป็นสารคีเลตธรรมชาติ มีลักษณะเป็นผงแป้งสีขาวที่อุณหภูมิห้อง สามารถละลายน้ำได้ดี มีสูตรโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.3 และมีสมบัติทางกายภาพ และเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของสาร (Nitrilotriacetic acid; NTA)

ที่มา: Bucheli-Witschel และ Egli (2001)

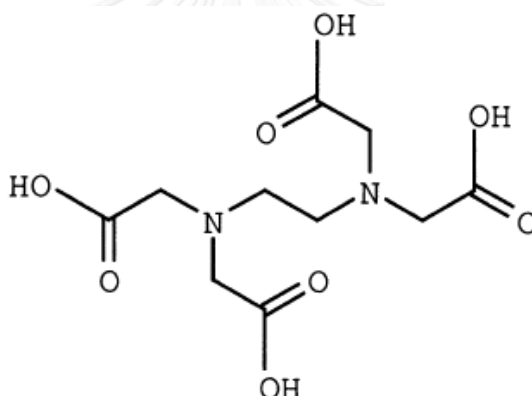
ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสาร NTA

คุณสมบัติ	รายละเอียด
สูตรทางเคมี	$C_6H_9NO_6$
มวลโมเลกุล	191.014 กรัมต่อโมล
จุดหลอมเหลว	230-235 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลายน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	59 กรัมต่อลิตร

ที่มา: HSDB (2009)

2) เอทิลีนไดเอมีนเทตระอะซีติก (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA)

เอทิลีนไดเอมีนเทตระอะซีติก (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA) หรือสาร EDTA เป็นสารคีเลตสังเคราะห์ มีลักษณะเป็นเกล็ดผงหรือสีขาว โดยมีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 และมีสมบัติทางกายภาพ และเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของสาร (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA)

ที่มา: Bucheli-Witschel และ Egli (2001)

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสาร EDTA

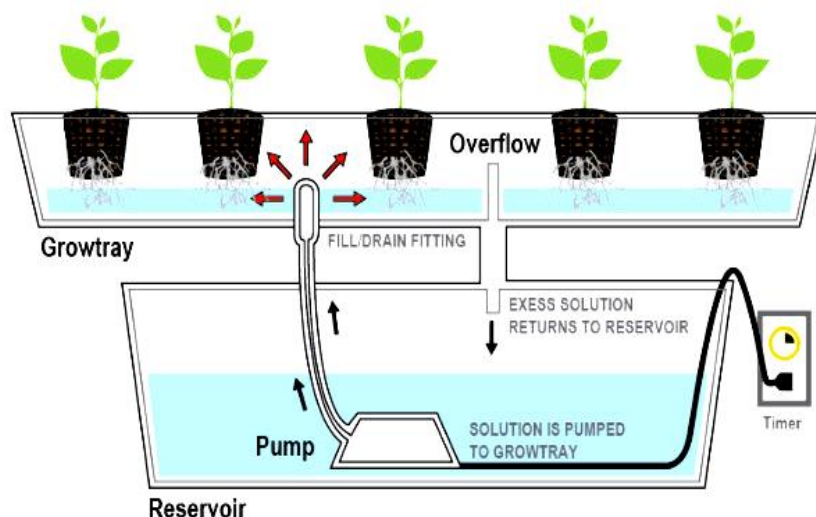
คุณสมบัติ	รายละเอียด
สูตรทางเคมี	$C_{10}H_{16}N_2O_6$
มวลโมเลกุล	292.25 กรัมต่อโมล
จุดหลอมเหลว	240 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	0.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ความสามารถในการละลายน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	0.4 กรัมต่อลิตร

ที่มา: Maryadele และคณะ (2001)

2.4 การปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

2.4.1 ความหมายของการปลูกพืชไร้ดิน

การปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics) หรือที่ปัจจุบันนิยมเรียกทับศัพท์ในชื่อเทคนิคเฉพาะว่า “ไฮโดรโพนิกส์” (Hydroponics) เป็นเทคนิคการปลูกพืชรูปแบบหนึ่งโดยไม่ใช้ดิน ซึ่งมาจากภาษากรีกสองคำ คือ คำว่า “ไฮโดร” (Hudor) หมายถึง น้ำ และ “โพนอส” (Ponos) หมายถึง แรงงาน หรือการทำงาน ซึ่งรวมความหมายเข้าด้วยกันก็คือ “การปฏิบัติงานเกี่ยวกับน้ำ” (Water-working) (ดิเรก ทองอร่าม, 2550) ไฮโดรโพนิกส์ได้นำไปสู่งานทางวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินหรือเป็นการปลูกพืชในวัสดุปลูกไร้ดิน หรือพืชอาจเจริญเติบโตได้ในอากาศที่มีการควบคุมความชื้นที่เหมาะสมแก่การเจริญของราก หรือปลูกในน้ำที่มีสารละลายธาตุอาหารผสมอยู่ ซึ่งมีการไหลเวียนของอากาศอย่างเหมาะสม หรือปลูกในวัสดุอื่น ๆ ที่ไม่มีการปนเปื้อนของดิน เช่น กรวด ทราย หินลอยน้ำ ฟางข้าว แกลบ และขี้เถ้า เป็นต้น (อานัฐ ตันโซ, 2548) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การปลูกพืชไร้ดิน

ที่มา: Kelly (2017)

2.4.2 ประเภทของการปลูกพืชไร้ดิน

ระบบการปลูกพืชไร้ดิน สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ (Mason, 1990) คือ

1) การปลูกพืชโดยให้รากพืชสัมผัสน้ำ (Water culture) เป็นการปลูกที่รากพืชจะเจริญในสารละลายธาตุอาหารพืชโดยตรง ได้แก่ (1) การปลูกแบบระบบให้สารละลายอาหารพืชไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นบาง ๆ บนรางปลูกอย่างต่อเนื่อง (Nutrient film technique; NFT) (2) การปลูก

แบบระบบให้สารละลายธาตุอาหารพืชไหลผ่านรากพืชแบบแผ่นหนาบวางปลูกอย่างต่อเนื่อง (Nutrient flow technique; NFLT) และ (3) การปลูกแบบระบบให้สารละลายธาตุอาหารพืชไหลผ่านรากพืชในรางปลูกระดับลึก (Deep flow technique; DFT)

2) การปลูกพืชในวัสดุที่ไม่มีดิน เป็นการปลูกที่ให้รากพืชเจริญเติบโตในวัสดุปลูกชนิดต่างๆ ที่เป็นของแข็ง วัสดุที่ใช้จะเป็นวัสดุที่มีธาตุอาหารอยู่น้อยหรือไม่มีเลย และมีการให้สารละลายธาตุอาหารในรูปของสารละลายหรือปุ๋ยเม็ด วัสดุส่วนใหญ่สามารถเก็บความชื้นได้ดี และระบายน้ำได้ดี มีความคงทน ไม่ย่อยสลายง่าย เช่น การใช้ทรายเป็นวัสดุปลูก (Sand culture) การใช้กรวดเป็นวัสดุปลูก (Gravel culture) การใช้หินเป็นวัสดุปลูก (Rockwood culture) การใช้ขี้เลื่อยเป็นวัสดุปลูก (Sawdust culture) และการใช้แผ่นพองน้ำเป็นวัสดุปลูก (Plastoponics) เป็นต้น

2.4.3 ข้อดี และข้อจำกัดของการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

1) ข้อดีของการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics) (ยศวนันท์ หงส์พิริยะกุล, 2553)

1) สถานที่ปลูก สามารถปลูกพืชได้ในบริเวณพื้นที่ที่มีสภาพไม่เหมาะสมต่อการเพาะปลูก เช่น ดินเปรี้ยว ดินเค็ม และทะเลทราย เป็นต้น

2) ใช้พื้นที่ปลูกน้อย และสามารถได้ผลผลิตอย่างสม่ำเสมอ

3) ใช้แรงงานน้อย ประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการเตรียมดิน และการกำจัดวัชพืช

4) การปลูกพืชแบบไร้ดินช่วยให้พืชใช้น้ำ และธาตุอาหารพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีการควบคุมปริมาณน้ำให้เหมาะสมกับพืช หรือมีการหมุนเวียนของน้ำนำกลับมาใช้ใหม่

5) สามารถตัดปัญหาเกี่ยวกับศัตรูพืชที่เกิดจากดิน ทำให้สามารถปลูกพืชในพื้นที่เดียวกันได้ตลอดปี และช่วยลดการแพร่ระบาดของโรคที่ติดมากับดิน

6) สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญของพืชได้อย่างถูกต้อง แนนอน และรวดเร็ว โดยเฉพาะในระดับรากพืช ได้แก่ การควบคุมปริมาณธาตุอาหาร ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ และความเข้มข้นของออกซิเจน เป็นต้น ซึ่งการปลูกพืชแบบทั่วไปทำได้ยาก ทำให้ปริมาณ และคุณภาพของผลผลิตที่ได้สูงกว่าแบบทั่ว ๆ ไป

2) ข้อจำกัดของการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics)

1) มีต้นทุนการติดตั้งระบบในระยะเริ่มต้นค่อนข้างสูง เนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ มากมาย และมีราคาแพง

- 2) ต้องอาศัยผู้ปลูกที่มีความรู้ความชำนาญ และมีประสบการณ์ ในการจัดการปลูกพืช และการจัดการธาตุอาหาร
- 3) พืชจะได้รับผลกระทบได้ง่าย และรวดเร็ว หากปลูกในสภาพพื้นที่ที่ไม่เหมาะสม
- 4) ต้องมีการควบคุมดูแลอย่างสม่ำเสมอ
- 5) วัสดุปลูกบางชนิดเน่าเปื่อยหรือสลายตัวยาก อาจเกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้หาก ไม่มีการควบคุมดูแลที่ดีพอ

2.5 หญ้าสกุลเนเปียร์

หญ้าเนเปียร์มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Pennisetum purpureum* Schumaach. และมีชื่อสามัญที่เรียกทั่วไปว่า Elephant grass อยู่ในกลุ่ม *Pennisetum* มีทั้งหมด 140 ชนิด (Brunken, 1977) ซึ่งเป็นหญ้าพื้นเมืองของแอฟริกาเขตร้อน มีอายุหลายปี แพร่กระจายอยู่ในเขตร้อน และกึ่งร้อนของโลก (Sollenberger และคณะ, 1990) ปัจจุบันในประเทศไทยมีหญ้าเนเปียร์อยู่หลายสายพันธุ์ ซึ่งพันธุ์หญ้าเนเปียร์ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ (รูปที่ 2.6) มีรายละเอียดดังนี้

หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Mott Dwarf Napier grass เป็นหญ้าที่มีอายุหลายปี มีลักษณะกอตั้งตรง มีขนาดความสูงของต้นประมาณ 170-180 เซนติเมตร ทรงพุ่มจะมีขนาดใหญ่ทำให้ปลายใบชี้ลงดิน ด้านบนและล่างของใบมีขนเล็กน้อย เป็นหญ้าที่ออกดอกเร็ว มีขนาดช่อดอกยาว 15-27 เซนติเมตร แต่เป็นหญ้าดอกที่ไม่ติดเมล็ด จึงไม่เป็นปัญหาวัชพืช เป็นพืชที่ชอบแสงเต็มที่ ดินดี มีน้ำเพียงพอแต่ไม่ท่วมขัง การเตรียมดิน และการปลูกเหมือนการปลูกอ้อยปลูกครั้งเดียวสามารถเก็บเกี่ยวได้นานถึง 6-7 ปี และมีผลผลิตสูงเฉลี่ย 40-80 ตันสดต่อไร่ต่อปี (รูปที่ 2.7)

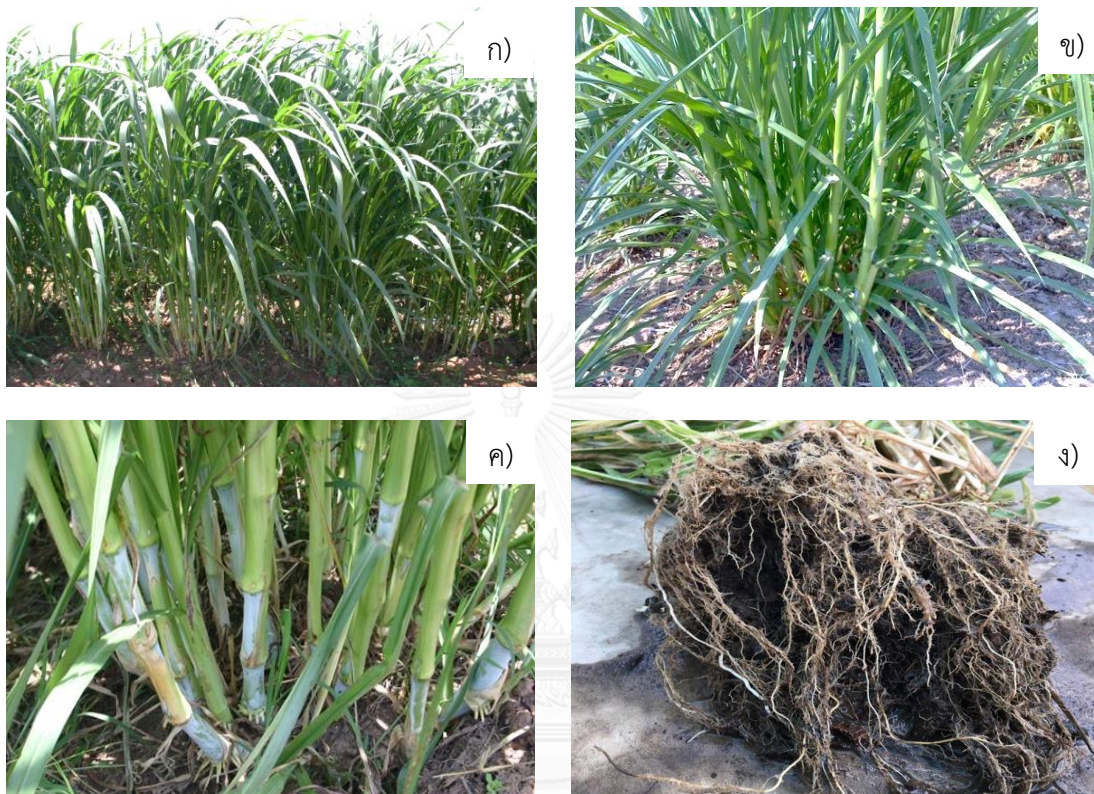
หญ้าเนเปียร์แคระเป็นพืชพื้นเมืองถูกนำเข้ามาในประเทศไทยครั้งแรกในเดือนพฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2532 โดยนายวิฑูรย์ กำเนิดเพชร นำเข้ามาจากมหาวิทยาลัยแห่งรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา นำมาปลูกทิ้งไว้ที่องค์การส่งเสริมกิจการโคนมแห่งประเทศไทย (อ.ส.ค.) โดยมีได้ศึกษารายละเอียด ต่อมา ศาสตราจารย์ ดร.สายัณห์ ทัดศรี ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้คัดเลือกหน่อพันธุ์ที่สมบูรณ์ไปปลูกขยายพันธุ์ โดยมีลักษณะเด่นพิเศษ 1) มีสัดส่วนของใบสูงกว่าลำต้น 2) ทนต่อความแห้งแล้งได้ดีมาก 3) ออกดอกช้า 4) ข้อถี่ ปล้องสั้น ยึดปล้องน้อย ทำให้ผลผลิตประกอบด้วยใบเป็นส่วนใหญ่ และ 5) มีการแตกกอดีกว่าหญ้าเนเปียร์ธรรมดา

สำหรับการจำแนกชั้นทางวิทยาศาสตร์ของหญ้าเนเปียร์แคระ สามารถจำแนกตามหลักอนุกรมวิธานได้ดังนี้

Kingdom	Plantae
Subkingdom	Tracheobionta
Superdivision	Spermatophyta
Division	Magnoliophyta
Class	Liliopsida
Subclass	Commelinidae
Order	Cyperales
Family	Poaceae
Sub-family	Panicoideae
Tribus	Paniceae
Genus	<i>Pennisetum</i>
Species	<i>Pennisetum purpureum</i>

สำหรับความสามารถในการปรับตัวของหญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) นั้นสามารถปรับตัวได้ในดินที่มีการระบายน้ำได้ดี และไม่ทนต่อสภาวะน้ำท่วมขัง อีกทั้งมีความสามารถในการทนอากาศหนาวเย็นได้ดีพอ ๆ กับหญ้าเนเปียร์เมอร์คีรอน (*Pennisetum purpureum* cv. Merkeron) และเมื่อเกิดน้ำค้างแข็งขึ้นอาจทำให้ใบ และช่วงส่วนเหนือดินตายได้ หากแต่สามารถทนทานอากาศหนาวเย็นได้อย่างต่อเนื่อง และเมื่อมีการงอกของต้นใหม่ออกจากเหง้า (Rhizome) ได้แล้วจะสามารถให้ผลผลิตได้นานถึง 8 ปี โดยเฉพาะมีการปลูกที่เมืองเกนส์วิลล์ รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา (Sollenberger และ Jones, 1989) อย่างไรก็ตามประเทศไทยมีการปลูกหญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) ที่มีความสามารถในการปรับตัวได้ดีในสภาพดิน และอากาศของประเทศไทย ไม่ว่าจะอยู่ภายใต้สภาวะอากาศค่อนข้างเย็นอย่างในอำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา (ศศิธร และคณะ, 2537) หรือจังหวัดชัยนาทที่มีการชลประทาน และเป็นดินที่อุดมสมบูรณ์ (กานดา และคณะ, 2538) รวมทั้งมีการปลูกในจังหวัดเพชรบุรี ที่เป็นดินชุดหุบกระพง หรือเป็นดินแบบร่วนปนทราย (วิรัช และคณะ, 2539) สำหรับในจังหวัดเพชรบูรณ์สามารถปลูกได้ในดินชุดป่าแดงแบบดินร่วนปนเหนียว (วีระศักดิ์ และคณะ, 2542) หรือการ

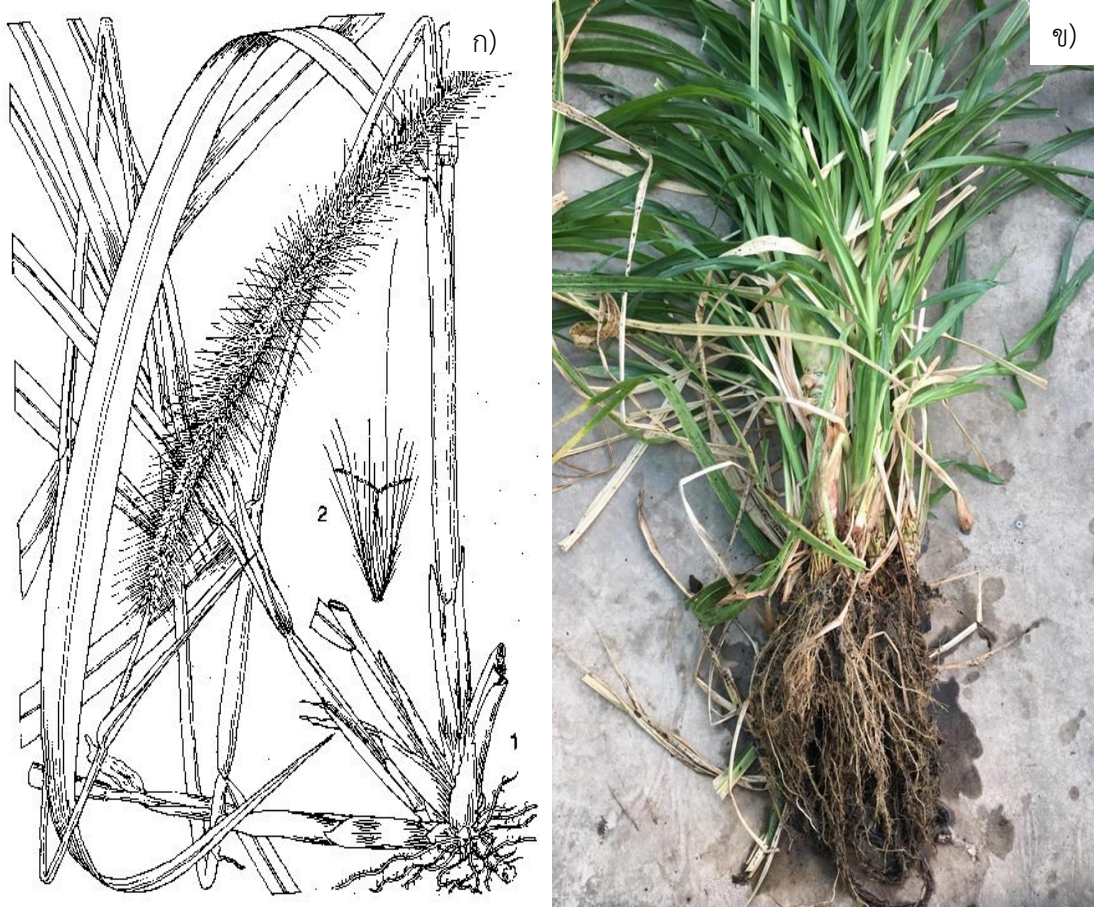
ปลูกในจังหวัดนครพนมที่เป็นดินชุดโพพพิสัยแบบดินเหนียวปนดินลูกรังซึ่งมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ (สมพล และคณะ, 2546) ทั้งนี้หญ้าเนเปียร์แคระมีความสามารถต่อการทนแล้งได้ดีเพราะมีระบบราก ลึก และไม่ชอบบริเวณร่มเงามากนัก (สายัณห์ ทัดศรี, 2548)



รูปที่ 2.6 หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott)

ก) ลักษณะลำต้นทั้งหมดของหญ้าเนเปียร์แคระ ข) ลักษณะกอของหญ้าเนเปียร์แคระ
 ค) ลักษณะโคนรากของหญ้าเนเปียร์แคระ และ ง) ลักษณะรากของหญ้าเนเปียร์แคระ

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา (2557)



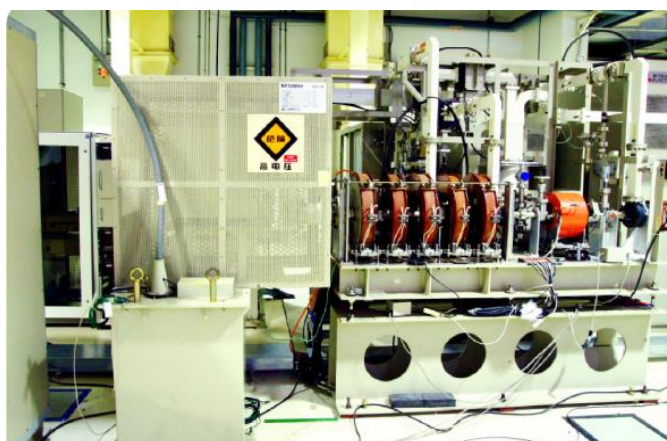
รูปที่ 2.7 ลักษณะหญ้าเนเปียร์ในวงศ์ *Pennisetum*
 ก รูปพรรณสัณฐานของหญ้าเนเปียร์ และ ข) รูปต้นจริงของหญ้าเนเปียร์แคะ
 ที่มา: Mannetje (1992)

2.6 แสงซินโครตรอน (Synchrotron)

2.6.1 ความหมายของแสงซินโครตรอน

แสงซินโครตรอน (Synchrotron) คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมา เมื่ออนุภาคพลังงานสูงที่มีประจุ เช่น อิเล็กตรอน ถูกบังคับให้เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ด้วยสนามแม่เหล็ก แสงซินโครตรอนเป็นแสงที่มีคุณลักษณะพิเศษที่โดดเด่นหลายประการ เช่น มีความสว่างจ้ามาก ความเข้มแสงสูง มีโพลาไรเซชัน (Polarization) มีความเป็นพัลส์ที่สั้นมาก (Very short pulsed) และมีสเปกตรัมต่อเนื่อง โดยจะครอบคลุมช่วงพลังงานตั้งแต่อันตรaviolet ถึงรังสีเอกซ์ จึงทำให้แหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนนี้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเพียงชนิดเดียวที่สามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นหรือพลังงานที่ต้องการใช้ประโยชน์ได้ มีประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีหลายสาขา เช่น ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา เกษษชีววิทยา แพทยศาสตร์ และธรณีวิทยา เป็นต้น (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, 2559) ในประเทศไทยมีเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน หรือเรียกว่า เครื่องกำเนิดแสงสยาม (Siam Photon Source) มีส่วนประกอบดังนี้ (ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ, 2549)

1) ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ปืนอิเล็กตรอนทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจำนวนมาก โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้กับไส้หลอดของปืนอิเล็กตรอนจนร้อน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา จากนั้นใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงขับเคลื่อนการดึงอิเล็กตรอนให้วิ่งไปเข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรงต่อไป ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun)

ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2559)

2) เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง ทำหน้าที่แบ่งอิเล็กตรอนที่ออกจากปืนอิเล็กตรอนให้เป็นกลุ่ม ๆ เรียกว่า Electron bunch หลังจากนั้นจะเร่งอิเล็กตรอนในแนวเส้นตรงด้วยคลื่นไมโครเวฟ ให้

มีพลังงานสูงถึง 40 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (40 MeV) และส่งไปยังเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม ดังรูปที่ 2.9



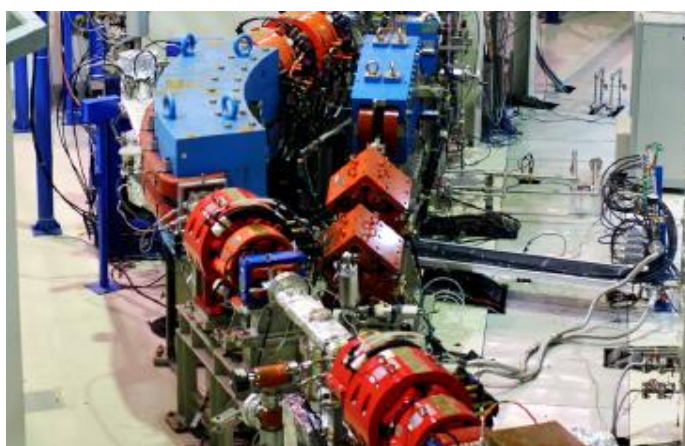
รูปที่ 2.9 เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (Linear accelerator; Linac)
ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2559)

3) เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม ทำหน้าที่เพิ่มพลังงานอิเล็กตรอนในแนววงกลมด้วยคลื่นวิทยุ ซึ่งการที่จะเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงมากตามที่ต้องการด้วยเครื่องเร่งอนุภาคในแนวเส้นตรงเพียงอย่างเดียว นั้น ตัวเครื่องเร่งอนุภาคจะต้องมีความยาวหลายกิโลเมตร แต่ด้วยการคิดค้นของนักวิทยาศาสตร์ จึงได้ออกแบบเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม เพื่อบังคับอิเล็กตรอนให้วิ่งในแนววงกลม และมีพลังงานมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีพลังงานเท่ากับ 1,000 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1 GeV) ในเวลาประมาณ 0.6 วินาที หรือเกือบเท่าความเร็วแสง แล้วจึงถูกส่งต่อไปยังวงกักเก็บอิเล็กตรอนต่อไป ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (Booster synchrotron)
ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2559)

4) วงกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage ring) วงกักเก็บอิเล็กตรอน ทำหน้าที่เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงถึง 1,200 ล้านอิเล็กตรอนโวลท์ (1.2 GeV) วงกักเก็บอิเล็กตรอนประกอบด้วยแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ได้แก่ แม่เหล็กสองขั้ว สี่ขั้ว และหกขั้ว เพื่อทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงเหล่านี้เคลื่อนที่ภายในท่อสุญญากาศ โดยบริเวณที่เป็นแม่เหล็กบังคับเลี้ยวสองขั้ว (Bending magnet) เป็นบริเวณที่มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเราเรียกว่า “แสงซินโครตรอน” ดังรูปที่ 2.11

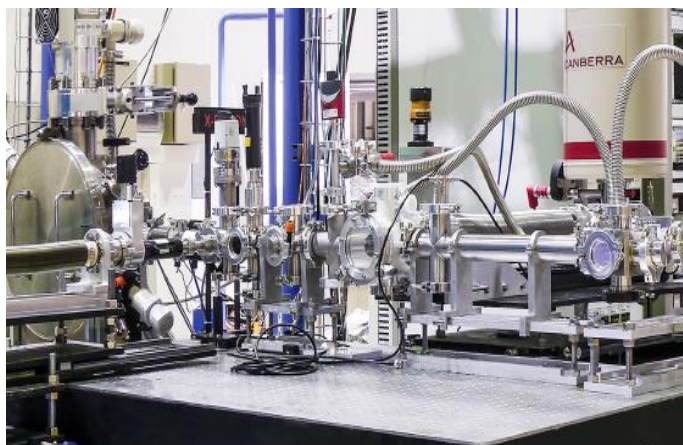


รูปที่ 2.11 วงกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage ring)

ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2559)

5) ระบบลำเลียงแสง (Beamlines; BL) ระบบลำเลียงแสง คือ ระบบที่ทำหน้าที่นำและเลือกแสงซินโครตรอนในย่านที่ต้องการ ที่ผลิตได้จากวงกักเก็บอิเล็กตรอนมายังสถานีทดลอง ระบบลำเลียงแสง ประกอบด้วย ท่อสุญญากาศ (Vacuum) กระจกรวมแสง (Collimating mirror) ระบบคัดเลือกพลังงานแสง (Monochromator) กระจกโฟกัสแสง (Focusing mirror) ระบบช่องสำหรับแสงส่องผ่าน (Slit) และอุปกรณ์ปลีกย่อยอื่น ๆ ส่วนท้ายสุดของระบบลำเลียงแสงจะเป็นสถานีทดลอง ซึ่งมีระบบวัดสัญญาณติดตั้งอยู่เพื่อดำเนินงานด้วยเทคนิคการทดลองเฉพาะด้าน เพื่อทำการวิจัยต่อไป ดังรูปที่ 2.12

6) สถานีทดลอง (Experimental station) ณ สถานีทดลอง เมื่อแสงซินโครตรอนวิ่งชนกับตัวอย่างจะเกิดการกระเจิง (Scattering) การดูดกลืน (Absorption) การปลดปล่อย (Emission) หรือการเรืองรังสี (Fluorescence) แล้วผ่านตัวตรวจวัดสัญญาณ (Detector) ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์และประมวลผลโดยนักวิทยาศาสตร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างของสารในระดับโมเลกุลหรือโครงสร้างอะตอม

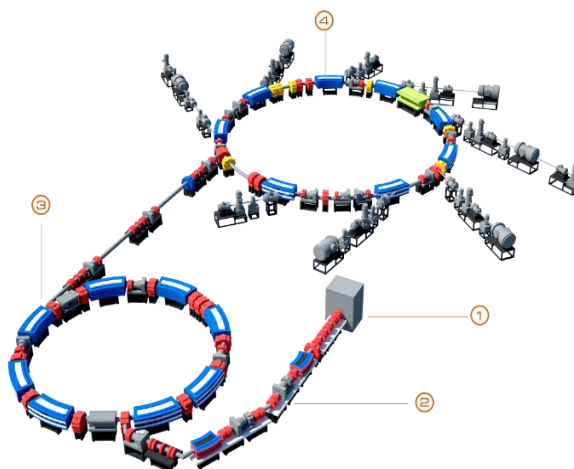


รูปที่ 2.12 ระบบลำเลียงแสง (Beamlines; BL)

ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2559)

2.6.2 วิธีการผลิตแสงซินโครตรอน

- 1) ขั้นตอนที่หนึ่ง คือ การผลิตอิเล็กตรอน โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้กับไส้โลหะของปืนอิเล็กตรอนจนร้อน จนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา จากนั้นจึงใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ขั้วบวกในการดึงอิเล็กตรอนให้วิ่งไปในทิศทางเดียวกัน
- 2) ขั้นตอนที่สอง เป็นการเร่งความเร็วอิเล็กตรอนในแนวเส้นตรง ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง หรือ linac เพื่อเร่งอิเล็กตรอนมีความเร็วสูงในระดับที่ต้องการ (40 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์) จากนั้นป้อนอิเล็กตรอนนี้เข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลมหรือเครื่องซินโครตรอน
- 3) ขั้นตอนที่สาม อิเล็กตรอนภายในเครื่องซินโครตรอนจะถูกบังคับให้วิ่งเป็นวงกลม และมีความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีความเร็วสูงเกือบเท่าความเร็วแสง (1,000 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ หรือ 1 GeV) หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะส่งเข้าสู่วงกักเก็บอิเล็กตรอนเป็นขั้นตอนสุดท้าย
- 4) ขั้นตอนที่สี่ วงกักเก็บอิเล็กตรอนทำหน้าที่เพิ่มพลังงานเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงถึง 1,200 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1.2 GeV) เพื่อการผลิตแสงซินโครตรอน ด้วยการใช้สนามแม่เหล็กบีบบังคับให้อิเล็กตรอนเลี้ยวเบนและปลดปล่อยแสงหรือโฟตอนออกมาขณะเลี้ยวเบน และกักเก็บอิเล็กตรอนที่ผลิตขึ้น เพื่อนำแสงซินโครตรอนมาใช้ประโยชน์และให้บริการแก่นักวิทยาศาสตร์ในงานวิจัยด้านต่าง ๆ ต่อไป ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วิธีการผลิตแสงซินโครตรอน
ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2559)

2.6.3 ระบบลำเลียงแสง BL6b: Micro-XRF (Micro-X-ray Fluorescence)

ระบบลำเลียงแสง BL6b: Micro-XRF มีส่วนประกอบของสถานีทดลอง ระบบลำเลียงแสง และเทคนิคที่ใช้ในระบบลำเลียงแสง BL6b (Tancharakorn และคณะ, 2012; สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2560) ดังนี้

1) ส่วนประกอบของสถานีทดลอง BL6b: Micro-XRF ประกอบด้วย 4 ส่วนสำคัญ ดังรูปที่ 2.14 ได้แก่

(1.1) กล้องไมโครสโคป (CCD microscope) ใช้สำหรับตรวจสอบและบันทึกภาพตัวอย่างก่อนทดลอง และขณะทำการทดลอง

(1.2) ระบบจับยึดตัวอย่าง (Sample stage) ใช้สำหรับเลื่อนตัวอย่างซ้ายขวาตั้งฉากกับแสง เพื่อทำการศึกษาการกระจายตัวของธาตุในตัวอย่างที่ทำการทดลอง

(1.3) เลนส์รังสีเอกซ์ (Polycapillary lens) โดยจะติดตั้งอยู่บนระบบการปรับแต่ง (Alignment) เนื่องจากต้องการความแม่นยำสูง

(1.4) ระบบวัดรังสี ณ สถานีทดลอง คือ Silicon PIN detector ซึ่งมีค่า Energy resolution ที่ 160 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ณ ตำแหน่ง Mn-K α line

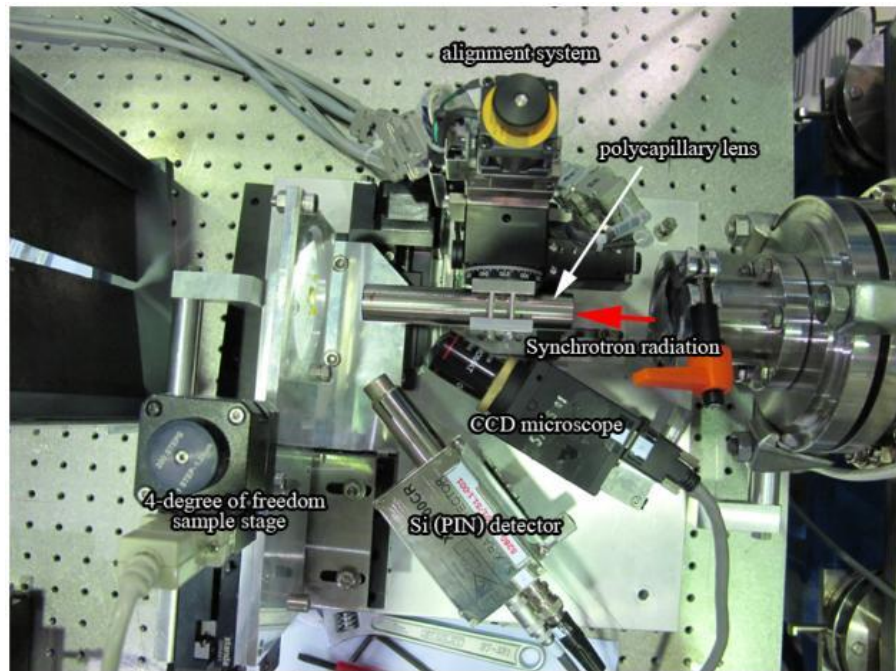
2) ส่วนประกอบของระบบลำเลียงแสง BL6b: Micro-XRF ประกอบด้วยส่วนสำคัญ (ดังรูปที่ 2.15) ได้แก่

(1.1) Beryllium window คือ ตัวกรองแสงซินโครตรอน ซึ่งยอมให้แสงซินโครตรอน ในย่านรังสีเอกซ์ผ่านได้เท่านั้น

(1.2) Shielding wall คือ กำแพงกันรังสีทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้รังสีแกมมาจากวงกัก เก็บอิเล็กตรอนหลุดออกมาข้างภายนอกส่วนทดลอง

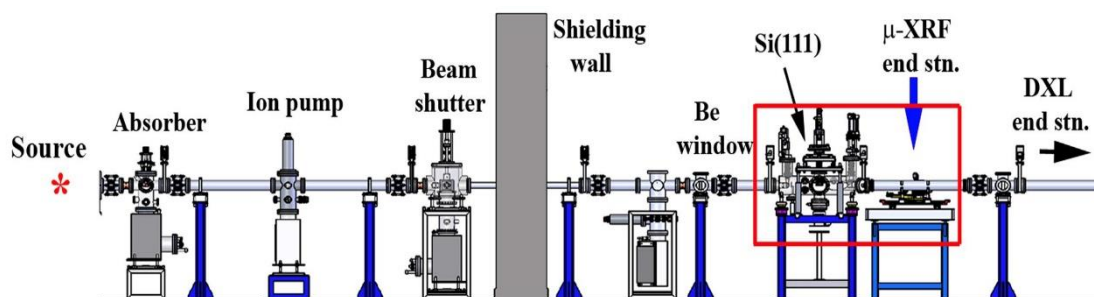
(1.3) Absorber และ Beam shutter คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปิดปิดเพื่อให้แสง ซินโครตรอนผ่านไปยังสถานีทดลอง

3) เทคนิคที่ใช้ในระบบลำเลียงแสง BL6b: Micro-XRF (Tancharakorn และคณะ, 2012) มีการใช้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่พลังงาน 2-10 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ (keV) จากแม่เหล็กสองขั้ว (Bending magnet; BM) ของวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาด 1.2 จิกะ อิเล็กตรอนโวลต์ (GeV) ซึ่งให้แสงซินโครตรอนตามเส้นสีดำในรูปที่ 2.16 โดยแสงซินโครตรอนนี้ ครอบคลุมพลังงานตั้งแต่รังสีอินฟราเรดไปจนถึงรังสีเอกซ์ (แกน y เป็นความหนาแน่นของแสง ซินโครตรอน (Flux density)) เมื่อผ่านตัวกรองแสง (Beryllium window) แสงซินโครตรอนถูกกรอง ให้เหลือเฉพาะย่านรังสีเอกซ์เท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 2.16 เส้นสีแดง และที่ตำแหน่งที่เป็นสถานีทดลอง BL6b:Micro-XRF แสงซินโครตรอนถูกโฟกัสด้วยเลนส์รังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นชนิดที่เรียกว่า Polycapillary half lens และให้แสงที่จุดโฟกัส หรือตำแหน่งตัวอย่างที่มีขนาด 100 x 100 ไมโครเมตร (μm) ดัง เส้นสีเขียวในรูปที่ 2.16 ตัวอย่างเช่น การศึกษาหลอดแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ไมโครเมตร (μm) วางตำแหน่งของตัวอย่าง และทำการเคลื่อนที่ตัดผ่านลำรังสีเอกซ์ วัดด้วยวิธี Wire-scan โดยมี ขนาดของลำแสงซินโครตรอน ณ ตำแหน่งตัวอย่าง 22 มิลลิเมตร (mm) จากทางออกของเลนส์รังสี เอกซ์ เมื่อหลอดแดงตัดผ่านลำของรังสีเอกซ์ อะตอมของหลอดแดงถูกกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์ของแสง ซินโครตรอนให้ขึ้นไปอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) หลังจากนั้นก็ตกกลับมายังสภาวะพื้น (Ground state) พร้อมกับคายรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยว (Cu-K α) 8 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) ออกมา และถูกบันทึกด้วยหัววัดรังสี สำหรับเทคนิค Micro-XRF นี้สามารถนำไปใช้ตรวจสอบ และติดตาม องค์ประกอบของธาตุในระดับอะตอม เช่น หิน โลหะ หรือตัวอย่างของสิ่งมีชีวิต เช่น ใบไม้ ต้นไม้ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ได้โดยการสร้างภาพการเรืองรังสีเอกซ์ (Tancharakorn และคณะ, 2012)



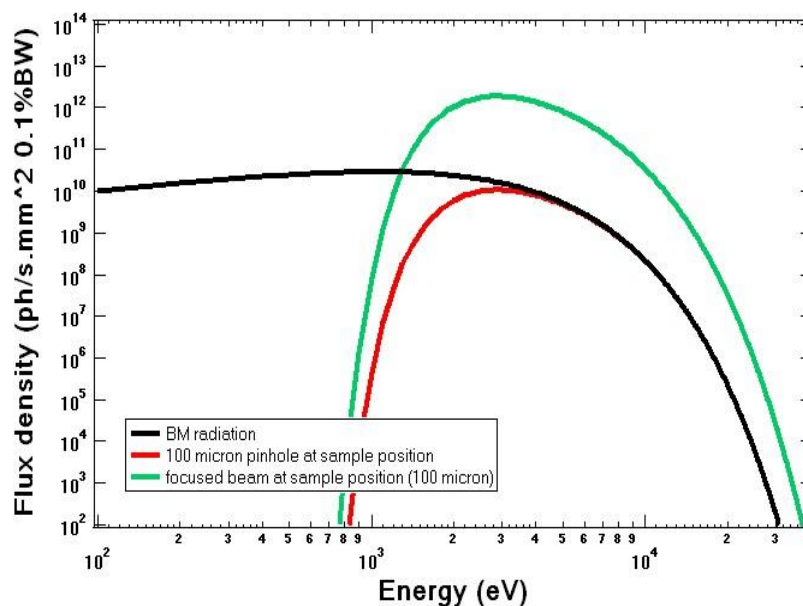
รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบของสถานีทดลองระบบลำแสง BL6b: Micro-XRF (Micro-X-ray Fluorescence) ณ ห้องปฏิบัติการแสงสยาม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) (Synchrotron Light Research Institute (Public Organization))

ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2559)



รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบของระบบลำแสง

ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2559)



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบลำเลียงแสง BL6b: Micro-XRF
ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (2559)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยด้านการศึกษาพืชที่ปลูกแบบในดินและปลูกแบบไร้ดิน (Phytoremediation and Hydroponics)

สรัดนา เสนาะ (2548) ได้ทำการศึกษาดูดึงโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ สังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว โดยใช้ทานตะวัน ข้าว และหญ้าแฝกทั้ง 2 สายพันธุ์ คือ พันธุ์ราชบุรี และพันธุ์สุราษฎร์ธานี ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 14, 221, 1,984 และ 6,462 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกิโลกรัม แคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 0.002, 3, 48 และ 227 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัม และตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 0.001, 14, 105 และ 345 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกิโลกรัม ผลการศึกษาพบว่า ทานตะวันและหญ้าแฝกสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีการปนเปื้อนสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว และหญ้าแฝกพันธุ์ราชบุรีให้น้ำหนักแห้งของในส่วนของรากต่ำกว่าพันธุ์สุราษฎร์ธานี แต่ให้น้ำหนักแห้งในส่วนของลำต้น และใบสูงกว่า โดยแฝกทั้ง 2 สายพันธุ์สามารถดูดดึงตะกั่วมาสะสมในลำต้น และใบได้ไม่แตกต่างกัน ส่วนทานตะวัน พบว่า ปริมาณการดูดดึงสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว มีการสะสมในลำต้นและใบมากที่สุด รองลงมา คือ ฐานรองดอก ราก และเมล็ด ตามลำดับสำหรับข้าว พบว่า มีการดูดดึงสังกะสี แคดเมียม และตะกั่วมาสะสมในส่วนรากมากกว่าส่วนลำต้นและใบ ส่งผลทำให้ข้าวแสดงอาการลำต้นและใบเป็นสีเหลือง (Chlorosis) ในระยะแตกกอ ลำต้นแคระแกร็น และไม่สามารถเจริญเติบโตได้เป็นปกติได้ในดินที่มีการปนเปื้อนสูง

Sampanpanish (2006) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับโครเมียมด้วยการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics) โดยวัชพืชที่นำมาทดลอง ได้แก่ หญ้าข้าวนก (*Echinochloa colonum*) หญ้าแพรก (*Cynodon dactylon*) และหญ้าแฝก (*Vetiveria nemoralis*) โดยระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] ที่ใช้เท่ากับ 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ [Cr(VI)] เมื่อระยะเวลาผ่านไป 2 เดือน รากของหญ้าข้าวนกมีความสามารถในการสะสมโครเมียมได้สูงสุดคือ 5,004 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามด้วยรากของหญ้าแพรก และหญ้าแฝก มีการสะสมโครเมียมเท่ากับ 3,786 และ 915 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ทำให้สามารถจัดจำแนกหญ้าข้าวนกเป็นพืช Hyperaccumulator ที่มีความสามารถในการดูดซับโครเมียมในน้ำที่มีการปนเปื้อนได้มากกว่าพืชชนิดอื่น ๆ

วรารณ ศรีตัมภา (2550) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียมออกจากดินที่ปนเปื้อนด้วยอ้อย (*Saccharum officinarum* L.) ได้แบ่งการศึกษออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ 1) การศึกษาในพื้นที่จริงของอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ดินมีการปนเปื้อนแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น <3, 3-20 และ >20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมทุกส่วนของอ้อยที่ระยะเวลา 9 เดือน มีค่าเท่ากับ 4.33, 4.86 และ 6.49 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม ตามลำดับ และ 2) การศึกษาในเรือนทดลองของอำเภอเมือง จังหวัดปราจีนบุรี ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม ได้แก่ ควบคุม, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ผลการศึกษาพบว่า มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในทุกลำต้นของอ้อยที่ระยะเวลา 9 เดือน เท่ากับ 8.66, 15.65, 17.47 และ 28.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของอ้อยจากพื้นที่จริงกับในเรือนทดลอง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น และทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินที่เพิ่มขึ้น ทั้งในพื้นที่จริงและในเรือนทดลอง

สุนิณี วดีศิริศักดิ์ (2550) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมจากดินด้วยต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus* Poir.) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ 1) วิธีการปลูกพืชในดิน ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซาวาเลนท์ Cr(VI) เท่ากับ 0 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ผลการศึกษาพบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ต้นก้างปลาสามารถสะสมโครเมียมทั้งหมดไว้ในส่วนของราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 390.57, 61.47 และ 58.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ที่เวลา 30 วัน และ 2) วิธีการปลูกพืชไร้ดินในน้ำเสียสังเคราะห์โครเมียมเฮกซาวาเลนท์ Cr(VI) ที่ระดับความเข้มข้น 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่ระดับความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ราก ลำต้น และใบของต้นก้างปลามีความสามารถในการดูดซับและสะสมโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 5,006.32, 42.26 และ 17.81 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนัก

แห้ง ตามลำดับ ที่เวลา 30 วัน ผลจากการสะสม และเคลื่อนย้ายโครเมียมในส่วนต่าง ๆ ของพืช แสดงให้เห็นว่า โครเมียมส่วนใหญ่ถูกเคลื่อนย้ายด้วยกระบวนการ Phytoextraction และต้นก้างปลาเป็นพืชที่มีศักยภาพสามารถนำมาใช้ในการกำจัดโครเมียมได้ดีโดยเฉพาะวิธีการปลูกพืชไร้ดิน ซึ่งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการปลูกพืชในดิน

Chaengcharoen (2007) ได้ทำการเปรียบเทียบการกำจัดโลหะหนักจากดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักซึ่งเก็บมาจากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และปลูกสาบเสือ (*Chromolaena odorata*) และหญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) และปลูกพืชดังกล่าวในดินสังเคราะห์ที่มีการใส่สารประกอบ $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, $Pb(NO_3)_2$ และ $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ โดยนำสารละลายของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดมาผสมรวมกัน ที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินของแต่ละโลหะหนัก และทำการใส่ลงในดินที่ไม่ปนเปื้อน ผลการศึกษาพบว่า สาบเสือและหญ้าแฝกสามารถเจริญเติบโตได้ตลอดระยะเวลาของการทดลองทั้งในดินที่ปนเปื้อน และดินสังเคราะห์ หากแต่พืชมีการแสดงอาการที่ผิดปกติ เช่น ใบขาวซีด ใบหงิก และใบไหม้ สำหรับปริมาณการสะสมโลหะหนักในส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยดินที่ปนเปื้อนนั้นสาบเสือมีการสะสมแคดเมียม สังกะสี ตะกั่ว และทองแดงสูงที่สุดในส่วนราก เท่ากับ 50.22, 123.45, 29.07 และ 31.89 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนหญ้านั้นมีการสะสมแคดเมียม สังกะสี ตะกั่ว และทองแดงในส่วนราก มีค่าเท่ากับ 11.24, 163.18, 40.63 และ 15.62 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบการสะสมแคดเมียมในสาบเสือ และหญ้านั้นมีการปลูกในดินที่ปนเปื้อนตลอดระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่า สาบเสือมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมได้ดีกว่าหญ้านั้นโดยเฉพาะในส่วนเหนือดิน และระยะเวลาที่ 4 เดือน เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียมได้ดีที่สุด

January และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาดูดซับในโลหะหนัก 5 ชนิด ได้แก่ แคดเมียม โครเมียม นิเกิล สารหนู และเหล็ก โดยใช้ทานตะวันที่ปลูกแบบพืชไร้ดิน (Hydroponics) ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 30 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0.265 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่า สาร EDTA ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับไว้ในส่วนรากและลำต้นของทานตะวันได้ผลดังนี้ เหล็ก > สารหนู > แคดเมียม > โครเมียม > นิเกิล ตามลำดับ ผลของการเติมสาร EDTA ช่วยให้ความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนรากลดลงจาก 2.11 เหลือ 1.36 มิลลิกรัมต่อลิตร และในส่วนลำต้นลดลงจาก 2.83 เหลือ 2.32 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของพืช พบว่า สาร EDTA มีผลทำให้น้ำหนักแห้งของพืชลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่มีการเติมสาร EDTA

Sampanpanish และ Tippayasak (2007) ได้ทำการศึกษาปริมาณการสะสมโครเมียมเฮกซวาเลนท์โดยวิธีการปลูกพืชไร่ดิน โดยพืชที่ใช้ในการศึกษาคือ ผักตบชวา (*Eichlornia crassipes* Hart. Solms.) และแว่นแก้ว (*Hydrocotyle umbellata* L.) ในน้ำเสียสังเคราะห์ทำการเติมโครเมียมเฮกซวาเลนท์ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซวาเลนท์ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เวลา 7, 15, 21 และ 30 วัน ผักตบชวาทั้งต้นมีการสะสมโครเมียมเท่ากับ 1.29, 1.76, 2.56 และ 2.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนแว่นแก้วในน้ำเสียสังเคราะห์ทำการเติมโครเมียมเฮกซวาเลนท์ที่ระดับความเข้มข้นของเท่ากับ 0, 5, 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า แว่นแก้วทั้งต้นมีปริมาณโครเมียมสะสมอยู่เท่ากับ 0.74, 1.10, 1.26 และ 1.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และยังพบว่า ในส่วนรากของพืชทั้งสองชนิดนี้มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปจากโครเมียมเฮกซวาเลนท์ไปเป็นโครเมียมไตรวาเลนท์ได้มากที่สุด ซึ่งในส่วนของผักตบชวาทั้งต้นนั้นเป็นพืชที่มีประสิทธิภาพสูงในการสะสมโครเมียมได้ดีกว่าแว่นแก้ว

ทิพวรรณ พจนานภรณ์ (2552) ได้ทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนัก 2 ชนิด คือ โครเมียมและตะกั่ว และศึกษาผลของสารคีเลต 2 ชนิด คือ สาร EDTA และสาร EDDS โดยใช้สับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย (*Ananas comosus* L. Merr.) ที่ปลูกในดินปนเปื้อน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 7 ชุดการทดลอง ดังนี้ ชุดการทดลองที่ 1) ไม่ใส่โลหะหนักและสารคีเลต (ควบคุม) ชุดการทดลองที่ 2) ใส่สารโครเมียมแต่ไม่ใส่สารคีเลต โดยใช้สารโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ที่ระดับความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ชุดการทดลองที่ 3) ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA ชุดการทดลองที่ 4) ใส่สารโครเมียมและสาร EDDS ชุดการทดลองที่ 5) ใส่สารตะกั่วแต่ไม่ใส่สารคีเลต โดยใช้สารตะกั่วไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) ที่ระดับความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ชุดการทดลองที่ 6) ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA และชุดการทดลองที่ 7) ใส่สารตะกั่วและสาร EDDS โดยเติมสารคีเลตทั้ง 2 ชนิดที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 เดือน ผลการศึกษาพบว่า ชุดการทดลองที่ใส่สารตะกั่วและสาร EDTA ที่ระยะเวลา 2 เดือน ช่วยดูดซับตะกั่วได้มากที่สุดไปไว้ในส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดินของสับปะรด เท่ากับ 288.14 และ 796.66 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองที่ใส่สารโครเมียมและสาร EDTA ที่ระยะเวลา 3 เดือน สามารถช่วยดูดซับโครเมียมได้มากที่สุดไปไว้ในส่วนเหนือดิน และส่วนใต้ดินของสับปะรดสูงสุด มีค่าเท่ากับ 545.72 และ 2,267.99 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า สาร EDTA สามารถช่วยเพิ่มการดูดซับโครเมียม และตะกั่วไปสะสมในส่วนต่าง ๆ ของสับปะรดได้สูงกว่าสาร EDDS หรือกล่าวได้ว่า สาร EDTA มีประสิทธิภาพดีกว่าสาร EDDS ในการดูดซับโครเมียม และตะกั่วที่

ปนเปื้อนในดินได้ นอกจากนี้สารคีเลตทั้ง 2 ชนิด ไม่ส่งผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโต และการแสดงความเป็นพิษของสับปะรด

ยศวนันท์ หงส์พิริยะกุล (2553) ได้ทำการศึกษาการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินและน้ำบริเวณห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี ด้วยการปลูกบอนเขียว (*Colocasia esculenta* L.) ลงในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว 13,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ดังนี้ ชุดการทดลองที่ 1 ดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่มีการสาร EDTA ชุดการทดลองที่ 2, 3 และ 4 คือ ดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 1, 2 และ 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 เดือน ผลการศึกษาพบว่า ชุดการทดลองดินที่ปนเปื้อนตะกั่วและเติมสาร EDTA 3 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ที่ระยะเวลา 5 เดือน บอนเขียวมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วได้ดีที่สุดในส่วนใต้ดิน เท่ากับ 8,561.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในส่วนเหนือดิน ได้แก่ ก้านใบ และใบ เท่ากับ 806.56 และ 611.82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนการปลูกบอนเขียวในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ใน 4 ชุดการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ และเติมสาร EDTA 0.02 มิลลิโมลต่อลิตร ที่ระยะเวลา 3 เดือน บอนเขียวสามารถดูดดึงตะกั่วได้ดีในส่วนใต้น้ำ เท่ากับ 502.84 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในส่วนเหนือน้ำ (ก้านใบ และใบ) เท่ากับ 126.19 และ 91.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า บอนเขียวมีความสามารถในการดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน และน้ำเสียสังเคราะห์ได้โดยไม่แสดงความเป็นพิษต่อบอนเขียว

Tananonchai (2011) ได้ทำการศึกษาผลของสาร EDTA และสาร DTPA ต่อการดึงดูดแคดเมียมในน้ำปนเปื้อนด้วยผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ดังนี้ 1) ชุดควบคุมที่ไม่มีการสารคีเลตทั้งสองชนิด 2) ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA 3) ชุดการทดลองที่เติมสาร DTPA และ 4) ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ร่วมกับสาร DTPA ทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 20, 30, 40, 60, 80 และ 100 วัน ผลการศึกษาพบว่า ผักตบชวามีความสามารถในการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) รองลงมา คือ ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ซึ่งสารคีเลตทั้งสองชนิดมีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมในผักตบชวา โดยในชุดที่เติมสาร EDTA 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 100 วัน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 160.91 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ส่วนในชุดที่เติมสาร DTPA และชุดที่เติมสาร EDTA ร่วมกับสาร DTPA 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 100 วัน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 231.78 และ 157.48 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การเติมสาร DTPA มีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวามากกว่าการเติมสาร EDTA และการเติมสาร EDTA ร่วมกับสาร DTPA

Sabeen และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาศักยภาพของต้นอ้อ (*Arundo donax* L.) ในการวิเคราะห์หาแคดเมียม ซึ่งใช้วิธีการปลูกในดินและการปลูกพืชไร้ดินด้วยวิธีการบำบัดแบบ Phytoextraction และทำการปลูกพืชในโรงเรือนกระจกในกระถางที่มีระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 0, 50, 100, 250, 500, 750 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 21 วัน ผลการศึกษาพบว่า ต้นอ้อที่ปลูกทดลองแบบไร้ดินนั้นมีการสะสมแคดเมียมได้มากกว่าต้นอ้อที่ปลูกในดิน โดยที่ระดับความเข้มข้น 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยชุดการทดลองที่ปลูกในดินมีปริมาณการสะสมแคดเมียมสูงสุดในส่วนราก เท่ากับ 230 ไมโครกรัมต่อกรัม และชุดการทดลองที่ปลูกพืชไร้ดินที่ระดับความเข้มข้น 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมแคดเมียมสูงสุดในส่วนราก เท่ากับ 300 ไมโครกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่า ต้นอ้อมีศักยภาพที่ดีเหมาะสำหรับการบำบัดแคดเมียมโดยวิธีการปลูกพืชไร้แบบไร้ดินมากกว่าการปลูกพืชในดิน

2.7.2 งานวิจัยด้านการศึกษาศาสตร์เคมีในการบำบัดโลหะหนักด้วยพืช

Tabatahai และ Bremner (1975) ได้ทำการศึกษาการสลายตัวของสาร NTA ในดิน โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบและวิเคราะห์สารอินทรีย์ไนโตรเจนหลังจากทำการอบดินภายใต้สภาวะที่ไร้ออกซิเจน (Anaerobic) และสภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตามช่วงเวลาต่าง ๆ ผลการศึกษาพบว่า สาร NTA สลายตัวได้อย่างง่ายดายโดยเซลล์จุลินทรีย์ในดินภายใต้สภาวะที่ไร้ออกซิเจน นอกจากนี้สารเอ็นทีเอไนโตรเจน (NTA-nitrogen) ประมาณ 95-100 เปอร์เซ็นต์ ได้ถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนเตรต (NO_3^-) และภายหลังจากบ่มภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน และสาร NTA ถูกย่อยสลายในช่วงระยะเวลา 60-98 วัน

Van Ginkel และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายของสาร EDTA ในน้ำ โดยมีการเก็บตัวอย่างน้ำทดลองจากแม่น้ำและทะเลสาบ เป็นการทดลองในขวดแบบระบบปิด และเติมสารอิดีทีเอไดโซเดียมซอลท์ (Na_2EDTA) ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 6.5 และ 8.5 ผลการศึกษาพบว่า ที่ระดับค่าความเป็นกรดเป็นด่าง เท่ากับ 6.5 ที่ระยะเวลา 28 วัน นั้นไม่พบการย่อยสลายตัวของสาร EDTA หรือพบการย่อยสลายเพียงเล็กน้อย ประมาณ 2-12 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อระยะเวลาผ่านไป 49 วัน พบว่า การย่อยสลายของสาร EDTA มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 60-83 เปอร์เซ็นต์ และสาร EDTA ที่ระดับของ pH เท่ากับ 8.0 ที่ระยะเวลา 28 วัน มีค่าการย่อยสลายของสาร EDTA ประมาณ 53-72 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อการทดลองผ่านไป 35 วัน มีค่าการย่อยสลายของสาร EDTA ประมาณ 75-89 เปอร์เซ็นต์

Santos และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาการใช้สารเคมี 2 ชนิด คือ สาร EDTA และสาร EDDS เพื่อช่วยให้พืชดูดดึงแคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิโมลต่อ

กิโลกรัมดิน โดยใช้หญ้าซิกแนลนอน (*Brachiaria decumbens*) ผลการศึกษาพบว่า EDTA สามารถช่วยให้หญ้าซิกแนลนอนดูดดึงแคดเมียม สังกะสี และตะกั่วในดินได้ เท่ากับ 1.77, 1.11 และ 1.87 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ส่วนสาร EDDS สามารถช่วยให้หญ้าซิกแนลนอนดูดดึงแคดเมียม สังกะสี และตะกั่วไปสะสมไว้ในส่วนลำต้นเหนือดิน คิดเป็น 2.54, 2.74 และ 4.30 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่า สาร EDDS นั้นมีความเป็นอันตรายต่อพืช น้อย และยังมีประสิทธิภาพในการช่วยให้หญ้าซิกแนลนอนมีการดูดดึงโลหะหนักในดินได้ดีกว่าสาร EDTA หรือสามารถช่วยให้เกิดการเคลื่อนย้ายประจุบวกของโลหะหนักจากรากสู่ส่วนลำต้นเหนือดิน นอกจากนี้ยังพบว่า หญ้าซิกแนลนอนสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม สังกะสี และ ตะกั่ว โดยไม่แสดงอาการความเป็นพิษจากโลหะหนัก อีกทั้งมีความทนทานต่อโลหะหนักได้ดี มีการเจริญเติบโตเร็ว และมีมวลชีวภาพสูง

กมลพฤกษ์ คงเมือง (2553) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้สารคีเลต 2 ชนิด คือ สาร EDTA และสาร CA ต่อการดูดดึงแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ดังนี้ 1) ชุดควบคุมไม่มีการเติมสารคีเลตทั้งสองชนิด 2) ชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA 3) ชุดการทดลองที่เติมสาร CA และ 4) ชุดการทดลองที่เติมสาร CA ร่วมกับสาร EDTA โดยทำการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน ผลการศึกษาพบว่า ผักตบชวามีความสามารถในการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) และ รongลงมา คือ ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) โดยในชุดการทดลองที่มีการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 15 วัน พบว่า ผักตบชวามีการสะสมแคดเมียมได้สูงสุดในส่วนราก เท่ากับ 645.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และในชุดการทดลองที่เติมสาร CA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 75 วัน พบว่า ผักตบชวามีการสะสมแคดเมียมได้สูงสุดในส่วนราก เท่ากับ 603.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง แสดงให้เห็นว่า การเติมสาร EDTA มีผลต่อการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวาในน้ำเสียสังเคราะห์มากกว่าการเติมสาร CA

ณัฐกาญจน์ ตันดิธีระศักดิ์ (2553) ได้ทำการศึกษาผลของสาร EDTA ต่อการดูดดึงแคดเมียม และสังกะสีด้วยการปลูกอ้อย (*Saccharum officinarum* L.) ในดินที่ปนเปื้อน โดยใช้ดินปนเปื้อนที่เก็บมาจากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และนำมาทำการปลูกในเรือนทดลอง เริ่มด้วยการปลูกอ้อยเป็นเวลา 1 เดือน และทำการเติมสาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 0, 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และเก็บเกี่ยวพืชที่ระยะเวลา 2, 4, 6 และ 8 เดือน ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนราก มีค่าเท่ากับ 21.87, 44.68, 57.52 และ 41.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ระยะเวลาของการเก็บเกี่ยว ตามลำดับ ซึ่งชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA 1 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดินที่ระยะเวลา 6 เดือน ทำให้อ้อยมีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมไปสะสมในส่วนราก

ได้มากที่สุด และชุดการทดลองที่ใส่สาร EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน มีผลทำให้อ้อยดูดดึงสังกะสีได้มากที่สุด โดยในส่วใบและส่วนชานอ้อยมีการสะสมสังกะสีมากที่สุดที่ระยะเวลา 2 เดือน เท่ากับ 87.18 และ 378.16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้นการสะสมแคดเมียมและตะกั่วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับความเข้มข้นของการเติมสาร EDTA

2.7.3 งานวิจัยด้านการศึกษาความเป็นพิษของพืช

Yongpisanphop และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาพืชน้ำ คือ ต้นแวนแก้ว (*Hydrocotyle umbellate* L.) เพื่อทำการศึกษากการสะสม และศึกษาความเป็นพิษของพืชที่เกิดจากสารตะกั่ว และโครเมียม โดยได้ทำการใช้สารละลายอาหาร Hoagland และเติมสารละลายตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น 20, 40, 60, 80 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมสารละลายโครเมียมที่ระดับความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 3, 6, 9 และ 12 วัน ผลการศึกษาพบว่า ต้นแวนแก้วมีการลดลงของอัตราการเจริญเติบโต รวมทั้งผลผลิตมวลชีวภาพ และปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงด้วย ซึ่งพบการสะสมของตะกั่ว และโครเมียมในส่วนรากปริมาณสูงกว่าส่วนลำต้น และใบของแวนแก้ว ในช่วงระยะเวลา 6 วันแรกของการทดลอง พบว่า ค่าเฉลี่ยของการสะสมโลหะหนักในรากพืชลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งตะกั่วมีค่าอัตราการสะสม (Bioconcentration factor; BCF) สูงกว่าโครเมียม แสดงให้เห็นว่า แวนแก้วมีอัตราการสะสมตะกั่วได้ดีกว่าโครเมียม สำหรับความเป็นพิษของตะกั่ว และโครเมียมที่มีต่อแวนแก้วนั้น พบว่า โลหะหนักสามารถทำให้การผลิตต้นอ่อนลดลง ก้านใบเหี่ยว และสีของรากเปลี่ยนจากสีขาวอมเขียวเป็นสีน้ำตาลเข้ม โดยเฉพาะตะกั่วส่งผลทำให้แวนแก้วใบเหลือง ส่วนโครเมียมส่งผลทำให้แวนแก้วใบตาย นอกจากนี้ยังพบว่า ระดับความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งสองชนิด และระยะเวลาในการทดลองที่เพิ่มขึ้นสามารถทำให้ความเป็นพิษของโลหะหนักเพิ่มขึ้นด้วย

Jamal และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาความเป็นพิษของอะลูมิเนียม และโครเมียมต่อการงอกและการเจริญเติบโตของข้าวสาลี (*Triticum astivum*) โดยทำการปลูกในเรือนโรงทดลอง มีการเติมสารละลายอะลูมิเนียม และโครเมียม 2 แบบ คือ การเติมแบบแยก และการเติมรวมกัน ที่ระดับความเข้มข้น 40, 80, 120 และ 160 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการสังเกตลักษณะการงอกของเมล็ด ได้แก่ ความยาวของเมล็ดความยาวราก ความยาวหน่อ และน้ำหนักแห้ง ผลการศึกษาพบว่า ชุดการทดลองที่ใส่สารอะลูมิเนียม ชุดการทดลองที่ใส่โครเมียม และชุดการทดลองที่ใส่สารอะลูมิเนียมร่วมกับโครเมียมนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อารงอกของเมล็ด และน้ำหนักแห้ง ส่วนความยาวราก ความยาวหน่อ และความยาวของเมล็ดที่งอกเมื่อเทียบกับชุดควบคุมพบว่า มีอัตราการลดลงที่ระดับความเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์ และจากผลการศึกษาพบว่า ความยาวรากที่งอก และอัตราการเจริญเติบโต

ของข้าวสาลีที่มีการเติมสารทั้งสองชนิดลดลงในทุกระดับความเข้มข้นของสารละลายอะลูมิเนียมและโครเมียมที่เพิ่มขึ้น

Shah และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการเจริญเติบโตของเมล็ดประตูแคก (*Dalbergia sissoo* Roxb.) เพื่อศึกษาผลกระทบจากการใช้สารละลายแคดเมียมซัลเฟต ($\text{Cd}(\text{SO}_4)_2$) และสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ที่ระดับความเข้มข้น 0, 10, 20, 40 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง 1 เดือน ผลการศึกษาพบว่า ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมและโครเมียมที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเมล็ดประตูแคก คือ ในช่วงระดับความเข้มข้นเท่ากับ 10-40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเฉพาะที่ระดับความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้การเจริญเติบโตของเมล็ดประตูแคกลดลง โดยชุดที่เติมโครเมียมนั้นแสดงความเป็นพิษต่อเมล็ดประตูแคกมากกว่าชุดที่เติมแคดเมียม โดยจำนวนใบ ความยาวราก ความยาวยอด น้ำหนักแห้งของใบ ยอด ราก และปริมาณคลอโรฟิลล์ สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดการเจริญเติบโตของเมล็ดประตูแคกได้

สุภาพร แป้งทา (2552) ได้ทำการศึกษาการใช้สับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย (*Ananas comosus* L. Merr.) เป็นตัวชี้วัดความเป็นพิษของโครเมียมและตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน โดยทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโครเมียม และตะกั่วที่ระดับความเข้มข้น 10 ระดับ ดังนี้ 100, 200, 400, 600, 800, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 และ 3,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า สับปะรดแสดงความเป็นพิษที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียมและตะกั่ว เท่ากับ 1,500 และ 2,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังนั้นจึงนำมาทดลองในขั้นตอนต่อไป ซึ่งมีการใส่สารโครเมียม และตะกั่ว โดยแยกชุดการทดลองกันที่ระดับความเข้มข้น 1,500 และ 2,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 เดือน ผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะเวลา 6 เดือน โลหะหนักดังกล่าวส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การแสดงความเป็นพิษของสับปะรดมากที่สุด โดยชุดที่ใส่โครเมียม และตะกั่ว แสดงความเป็นพิษ เท่ากับ 88.78 และ 23.73 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า โครเมียมมีความเป็นพิษต่อสับปะรดมากกว่าตะกั่ว ซึ่งโครเมียมทำให้ใบตาย ขณะที่ตะกั่วทำให้ใบเหลือง นอกจากนี้ การแสดงความเป็นพิษของโลหะหนักทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของสับปะรดเพิ่มขึ้นด้วย

2.7.4 งานวิจัยด้านการศึกษาหญ้าเนเปียร์

จิโนรส ศรีศิริ และคณะ (2556) ได้ทำการศึกษาและประเมินศักยภาพพืชพลังงาน 7 สายพันธุ์ ได้แก่ หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) หญ้าแพงโกล่า (*Digitaria eriantha*) หญ้ากินนีสีม่วง (*Panicum maximum*) หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (*Pennisetum purpureum* cv. King grass) หญ้าปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1) หญ้า

บาน่า (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* cv. Bana grass) และหญ้าเนเปียร์ม่วงเหล็ก (*Pennisetum purpureum* cv. Mauklek) เพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่า หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าบาน่าที่ทำการตัดในช่วงการเจริญเติบโตที่ระยะเวลา 60 วัน นั้นมีลักษณะทางกายภาพที่โตเร็ว และให้ปริมาณเซลลูโลสที่สูง นอกจากนี้ยังพบว่า หญ้าเนเปียร์มีเปอร์เซ็นต์การผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด เท่ากับ 50.2 รองลงมา คือ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ เท่ากับ 48.7 และหญ้าบาน่า เท่ากับ 46.7 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า หญ้าเนเปียร์สามารถนำมาใช้เป็นพืชพลังงานทางเลือกเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับพืชพลังงาน โดยการนำมาประยุกต์ใช้เป็นชีวมวลเพื่อการผลิตไบโอแก๊สหรือก๊าซชีวภาพได้

Zhang และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาการเจริญเติบโต และการสะสมแคดเมียม โดยใช้พืชพลังงาน คือ หญ้าบาน่าซึ่งเป็นหญ้าเนเปียร์ลูกผสม (*Pennisetum americanum* x *P. purpureum*) ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม เท่ากับ 0, 8, 15, 30, 60 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ผลการศึกษาพบว่า หญ้าบาน่ามีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมในดินเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วน ของราก เท่ากับ 206 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รองลงมา คือ ในส่วนลำต้นมีปริมาณการสะสมแคดเมียม เท่ากับ 68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในส่วนใบมีปริมาณการสะสมแคดเมียม เท่ากับ 43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และยังพบว่า หญ้าบาน่ามีความสามารถในการให้ผลผลิตรวม 0.94-1.31 กิโลกรัมต่อเฮกตาร์ และมีผลผลิตชีวมวล 216-375 ตันต่อเฮกตาร์ต่อวัน และ 28-79 ตันต่อเฮกตาร์ของมวลชีวภาพแห้ง ในแต่ละปี แสดงให้เห็นว่า หญ้าบาน่ามีผลผลิตมวลชีวมวลสูง และมีศักยภาพในการบำบัดโลหะหนัก แคดเมียมได้ ดังนั้นหญ้าบาน่าสามารถนำมาปลูกเป็นพืชพลังงานในดินปนเปื้อนแคดเมียม และเป็นประโยชน์สำหรับการฟื้นฟูดิน

ประณต มณีอินทร์ และคณะ (2558) ได้ทำการศึกษาระยะเวลาการตัดหญ้าเนเปียร์ 4 พันธุ์ คือ หญ้าปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* Pakchong 1) หญ้าบาน่า (*Pennisetum purpureum* x *P. glaucum* cv. Bana grass) หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (*Pennisetum purpureum* cv. King grass) และหญ้าเนเปียร์ไต้หวัน A-148 (*Pennisetum purpureum* cv. Taiwan A-148) โดยศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ผลผลิตชีวมวล และการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาการตัด 45, 60, 120 และ 180 วัน ผลการศึกษาพบว่า หญ้าเนเปียร์ยักษ์ที่ระยะเวลาการตัด 180 วัน ให้ผลผลิตชีวมวลสูงสุดที่ 8.38 ตันต่อไร่ต่อปี และก๊าซมีเทนสูงสุดที่ 61.16 ตันต่อลูกบาศก์เมตร รองลงมา คือ หญ้าบาน่า หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 และหญ้าเนเปียร์ไต้หวัน A-148 ดังนั้นจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ผลผลิตชีวมวลต่อไร่ต่อปีที่การตัดทุก 180 วันให้ผลผลิตชีวมวลสูงสุด จึงทำให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงตามด้วย

สุริยะ สมศิริ และ วิวรรณภัทรกิจ (2558) ได้ทำการศึกษาหาปริมาณก๊าซซีพีเคชัน ก๊าซชีวภาพ และไบโอเอทานอลจากหญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum purpureum*) ที่ได้จากพื้นที่การเพาะปลูกต่อไร่ในระยะเวลา 1 ปี สำหรับการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์ 2 วิธี คือ 1) การวิเคราะห์ทางทฤษฎีเป็นการนำสมการเคมีหรือค่าทางทฤษฎีมาวิเคราะห์ และ 2) การวิเคราะห์จากผลการทดลองเป็นการนำผลการทดลองจากงานวิจัยมาคำนวณหาพลังงานที่ได้ ผลการศึกษาพบว่า ก๊าซซีพีเคชันเป็นกระบวนการที่สามารถแปรรูปหญ้าเนเปียร์ไปเป็นพลังงานได้มากที่สุด ซึ่งจากผลการคำนวณทางทฤษฎี และการคำนวณจากผลการทดลองมีค่าเท่ากับ 304.92 และ 203.01 จิกะจูล (GJ) ต่อไร่ต่อปี ตามลำดับของวิธีการวิเคราะห์ รองลงมาคือ การแปรรูปของหญ้าเนเปียร์เป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งจากผลการคำนวณทางทฤษฎี และการคำนวณจากผลการทดลองมีค่าเท่ากับ 158.70 และ 88.66 จิกะจูล (GJ) ต่อไร่ต่อปี ตามลำดับของวิธีการวิเคราะห์ และการแปรรูปของหญ้าเนเปียร์เป็นไบโอเอทานอลพบว่า พลังงานที่ได้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งจากผลการคำนวณทางทฤษฎี และการคำนวณจากผลการทดลองมีค่าเท่ากับ 103.15 และ 84.8 จิกะจูล (GJ) ต่อไร่ต่อปี ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ก๊าซซีพีเคชันมีศักยภาพในการแปรรูปหญ้าเนเปียร์ไปเป็นพลังงานมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สชีวภาพและไบโอเอทานอล

นิลวรรณ ไชยหนู และคณะ (2559) ได้ทำการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) ทั้งหญ้าสดและหญ้าที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายต่าง 2 ชนิด ได้แก่ 1) สารละลายโซดาไฟ (NaOH) เข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ (w/v) และ 2) น้ำปูนขาว (Ca(OH)₂) ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ (w/v) ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องใช้ระยะเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.181 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม (m³/kg) เมื่อไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายต่าง และหญ้าเนเปียร์แคระมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.273 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม (m³/kg) เมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยการแช่สารละลายโซดาไฟเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ (w/v) นาน 1 ชั่วโมง ทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันกับหญ้าสายพันธุ์อื่น ๆ เช่น หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่ถูกส่งเสริมให้ใช้เป็นพืชพลังงาน ดังนั้นจึงถือได้ว่า หญ้าเนเปียร์แคระนี้มีศักยภาพที่สามารถใช้เป็นพืชพลังงานทางเลือกหนึ่งได้

2.7.5 งานวิจัยด้านการศึกษาแสงซินโครตรอน

Nakbanpote และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาการสะสมและความทนทานต่อสังกะสีและแคดเมียมด้วยต้นว่านมหากาฬที่ปลูกในระบบเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ ซึ่งมีการเติมสังกะสีและแคดเมียมในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ และทำการวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอน ซึ่งเป็นการศึกษาสถานะออกซิเดชันรูปแบบทางเคมีของสังกะสีและแคดเมียม รวมถึงการกระจายตัวของโลหะในส่วน

ต่าง ๆ ของพืชด้วยเทคนิค Extended X-ray absorption fine structure (EXAFS) และ Synchrotron X-ray fluorescence (SXRF) ผลการศึกษาพบว่า ต้นว่านมหากาฬมีการส่งผ่านสังกะสีและแคดเมียมจากส่วนรากไปสู่ส่วนหัว และส่งผ่านตามท่อลำเลียงไปสะสมยังลำต้นและใบ โดยพบว่า สังกะสีและแคดเมียมมีการสะสมมากบริเวณชั้นคอร์เท็กซ์ (Cortex) และสะสมน้อยในเนื้อเยื่อบริเวณแกนกลางลำต้นและเนื้อเยื่อลำเลียง สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง EXAFS Zn K-edge พบว่า ส่วนหัว (ลำต้นใต้ดิน) ของว่านมหากาฬมีการสะสมสังกะสีในรูป Zn (II) โดยไอออนจับอยู่กับอะตอมออกซิเจน (Zn-O) ส่วนการสะสมแคดเมียมได้มีการนำเข้าไปสะสมยังส่วนเนื้อของหัว โดยแคดเมียมที่สะสมอยู่ในรูปของ Cd (II) ไอออน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ต้นว่านมหากาฬมีกลไกการสะสมโลหะสังกะสี และแคดเมียมไปเก็บไว้ในเซลล์ชั้นคอร์เท็กซ์ของลำต้น และเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นพาราเรงโคมาร์ (Parenchyma) ของใบพืชด้วย

Nanthavong (2012) ได้ทำการศึกษาผลของสาร NTA และ EDTA ต่อการดูดดึงสารหนูในราก ลำต้น และใบของต้นไมยราบ การศึกษาเบื้องต้นได้ทำการทดสอบความเป็นพิษของสารหนูที่มีต่อต้นไมยราบ โดยการเติมสารไดโซเดียมไฮโดรเจนอาซิเนท ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 5, 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200, 300 และ 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และทดสอบ NTA และ EDTA ที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน จากนั้นจึงปลูกต้นไมยราบเป็นระยะเวลา 1 เดือน ผลการศึกษาเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่า ต้นไมยราบสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีความเข้มข้นของสารหนูน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ในขณะที่ความเข้มข้นอื่นๆ แสดงความเป็นพิษต่อพืช เช่น ใบและลำต้นแห้ง หรือหงิกงอ ส่วน NTA และ EDTA ไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช สำหรับการทดลองหลักได้เติมสารหนูที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ทั้งไว้เป็นระยะเวลา 3 เดือน หลังจากนั้นจึงปลูกต้นไมยราบ 1 ต้นต่อ 1 กระถาง และเติม NTA และ EDTA แยกกันที่ความเข้มข้น 3 ระดับดังกล่าว ทำการเก็บตัวอย่างดิน และพืชทุก ๆ 30 วัน เป็นระยะเวลา 120 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารหนู ผลการศึกษาพบว่า สารหนูสะสมอยู่ในรากมีความเข้มข้นสูงกว่าอยู่ในลำต้นและใบ ซึ่งความเข้มข้นสูงสุดอยู่ที่ระยะเวลา 120 วัน พบว่า ในรากมีค่าเท่ากับ 29.71 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกิโลกรัมพืช ส่วนในลำต้นและใบมีค่าเท่ากับ 6.32 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกิโลกรัมพืช และพบว่า มีการสะสมมากที่สุดในการทดลองที่เติม EDTA 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งในการเก็บเกี่ยวที่ระยะเวลาและความเข้มข้นเดียวกัน พบว่า EDTA มีความสามารถในการเร่งการดูดดึงสารหนูเข้าสู่ต้นไมยราบได้ดีกว่า NTA นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Synchrotron μ -X-ray fluorescence spectroscopy (Beamline 6b) ไม่สามารถตรวจพบรูปแบบการแพร่กระจายของสารหนูในส่วนต่าง ๆ

ของต้นไมยราบที่ระดับความเข้มข้นดังกล่าวได้ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ และความเข้มข้นของสารหนูในตัวอย่างที่น้อยเกินไป

กัลย์สุตา ปิ่นพา (2557) ได้ทำการศึกษาผลของสารคีเลต และค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่อการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตะกอนท้องน้ำด้วยผักตบชวา โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ 1) ชุดควบคุมที่มีดินปนเปื้อน และมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ระดับ 4, 5, 7 และ 9 และ 2) ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนและเติมสารคีเลตและมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ (1) ชุดดินปนเปื้อนที่มีการเติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ระดับ 4, 5, 7 และ 9 (2) ชุดดินปนเปื้อนที่มีการเติม DTPA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ระดับ 4, 5, 7 และ 9 และ (3) ชุดดินปนเปื้อนที่มีการเติม EDTA และ DTPA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ระดับ 4, 5, 7 และ 9 แล้วทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 เดือน เพื่อวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา ผลการศึกษาพบว่า ผักตบชวา มีความสามารถในการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ ส่วนการเติมสารคีเลตทั้ง 2 ชนิดร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ระดับต่าง ๆ มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมของผักตบชวา โดยชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA และ DTPA ที่ระดับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 พบการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ เท่ากับ 112.73 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งพืช ในส่วนเหนือน้ำพบแคดเมียม เท่ากับ 14.23 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งพืช ที่เวลา 90 วัน และชุดการทดลองที่เติมสาร EDTA ที่ระดับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 พบการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ เท่ากับ 62.55 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งพืช ในส่วนเหนือน้ำพบแคดเมียม เท่ากับ 10.23 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งพืช ที่เวลา 30 วัน และชุดการทดลองที่เติมสาร DTPA ที่ระดับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 พบการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ เท่ากับ 61.17 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งพืช ในส่วนเหนือน้ำพบแคดเมียม เท่ากับ 10.20 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งพืช ที่เวลา 30 วัน และได้ทำการศึกษาการสะสมแคดเมียม โดยการวิเคราะห์ใช้ระบบลำแสงรังสีเอกซ์ที่ 6 (BL6b) ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (Micro-XRF/XRD) จากผลการวิเคราะห์ไม่สามารถตรวจวัดการสะสมแคดเมียมได้ทั้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของผักตบชวา มีปริมาณความเข้มข้นที่ต่ำเกินไป ซึ่งเป็นข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือวิเคราะห์

จากงานวิจัยข้างต้นได้มีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวข้องกับการนำเทคโนโลยีการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยพืช (Phytoremediation) และด้วยวิธีการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponics) มาใช้ในการกำจัดแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ จึงได้นำแนวคิดมาศึกษาโดยใช้พืชในการบำบัด คือ หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) เป็นตัวกลางในการดูดดึงแคดเมียมใน

น้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งหญ้าเนเปียร์แคะนั้นเป็นพืชชีวมวล (Biomass) ที่กำลังได้รับความสนใจในการผลิตพลังงานทดแทน (Renewable energy) เนื่องจากมีต้นทุนในการปลูกต่ำ ให้ผลผลิตต่อไร่สูง ดูแลรักษาง่าย และเจริญเติบโตเร็ว อีกทั้งงานวิจัยครั้งนี้ได้นำพีชมาช่วยแก้ไขปัญหาละหะหนักที่ตกค้างหรือปนเปื้อนในน้ำร่วมกับการใช้สารคีเลต (Chelating agent) ซึ่งได้ทำการศึกษาความสามารถของสาร EDTA และ NTA ร่วมด้วย เพื่อช่วยในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ให้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น ผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการฟื้นฟูพื้นที่จริงที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมได้



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาความสามารถของหญ้าเนเปียร์แคระในการดูดดึงแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารละลายแคดเมียมปนเปื้อน และมีการใช้สารคีเลตร่วมช่วยในการดูดดึงแคดเมียมไปสะสมไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืช มีรายละเอียดวิธีดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 สถานที่ดำเนินการวิจัย

3.1.1 การดำเนินการทดลองได้ปฏิบัติในโรงเรือนเพาะชำ ชั้น 2 และห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ ชั้น 3 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังรูปที่ 3.1 ก) และ ข)

3.1.2 การวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอน (Synchrotron) โดยนำตัวอย่างไปวิเคราะห์การกระจายตัวของแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของพืช ณ ห้องปฏิบัติการแสงสยาม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) (Synchrotron Light Research Institute (Public Organization)) ภายใต้การกำกับดูแลของกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตั้งอยู่ภายในบริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ดังรูปที่ 3.1 ค) และ ง)

3.2 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกพืชทดลอง

- 1) หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) ดังรูปที่ 3.2
- 2) กระจกพลาสติกสีดำที่มีรูระบายน้ำ และจานรองกระจก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร (สำหรับเพาะชำพืช)
- 3) ภาชนะพลาสติก ขนาด 1.5 ลิตร พร้อมกล่องทึบแสงขนาดกว้าง 38 เซนติเมตร กว้าง 52 เซนติเมตร และสูง 32 เซนติเมตร (สำหรับปลูกพืชในน้ำ)
- 4) โฟม
- 5) ฟองน้ำ
- 6) น้ำประปา
- 7) น้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI)
- 8) ถังพลาสติกสีดำแบบหนา
- 9) ปากกาทำเครื่องหมาย
- 10) ปืนอากาศ และหัวฟู่เดิมอากาศ

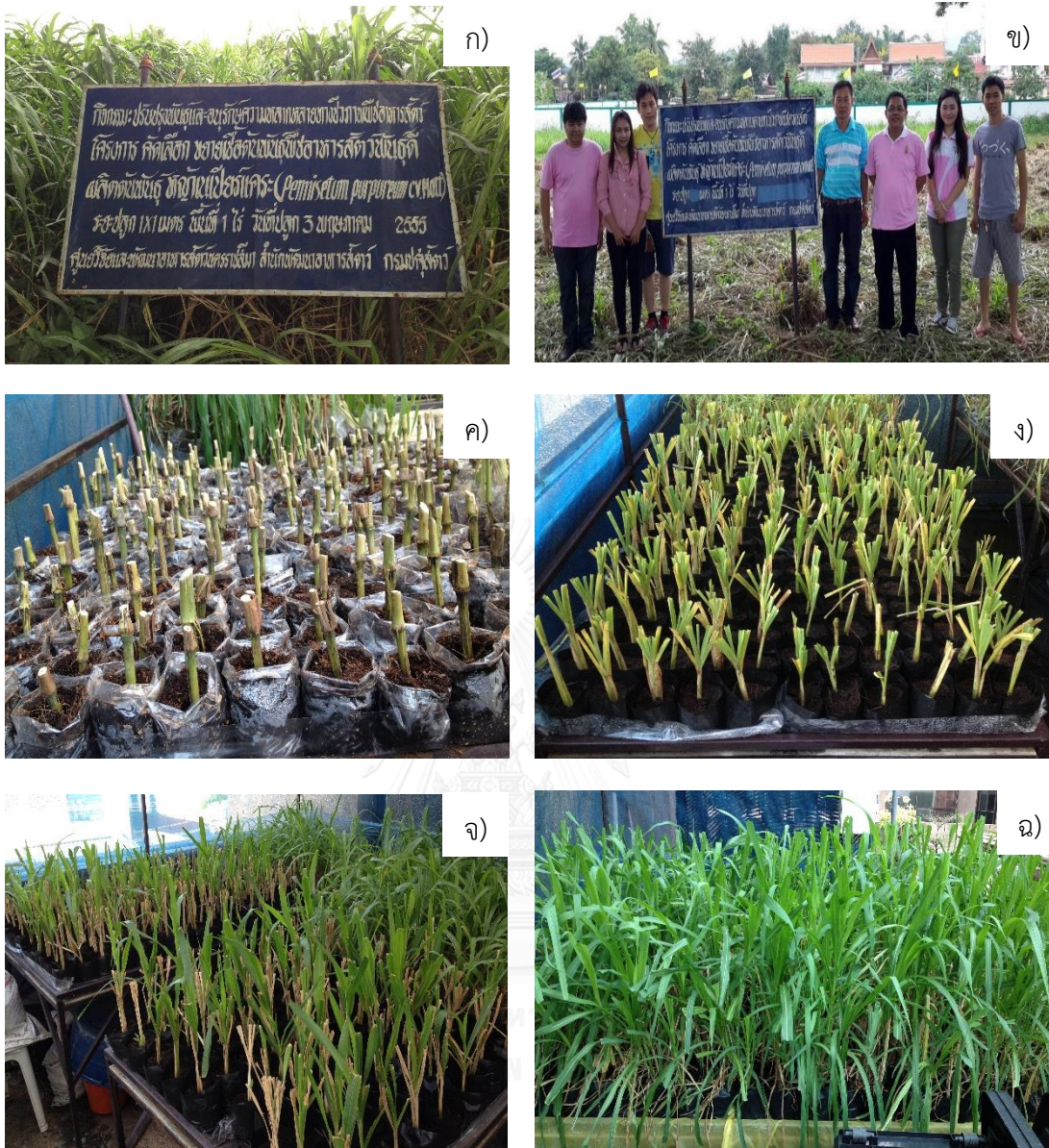
- 11) เรือนเพาะชำ ขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 6 เมตร สูง 3 เมตร
- 12) ธาตุอาหารสำหรับพืชไร้ดินสูตร A และ B

3.2.2 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำ และพืช

- 1) ถุงพลาสติกใสแบบมีซิปลงสำหรับเก็บตัวอย่างพืช
- 2) ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำขนาด 200 มิลลิลิตร
- 3) น้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI)
- 4) ตะกร้าพลาสติก
- 5) แผงอัดพรรณไม้ (Plant press) ขนาด 30 x 50 เซนติเมตร
- 6) ปากกาทำเครื่องหมาย และฉลากสำหรับติดตัวอย่าง



รูปที่ 3.1 สถานที่ดำเนินการวิจัย ก) โรงเรือนเพาะชำ ชั้น 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ข) ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ ชั้น 3 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ค) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และ ง) ภาพรวมห้องทดลองของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)



รูปที่ 3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ก) หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) ข) สถานที่ทำการเก็บตัวอย่างพีชวิจัย ค) การปักชำท่อนพันธุ์หญ้าเนเปียร์แคระ ง) หญ้าเนเปียร์แคระเมื่อเริ่มเพาะชำ จ) หญ้าเนเปียร์แคระเมื่ออายุครบ 2 สัปดาห์ และ ฉ) หญ้าเนเปียร์แคระเมื่ออายุครบ 2 เดือน และพร้อมทำการทดลอง

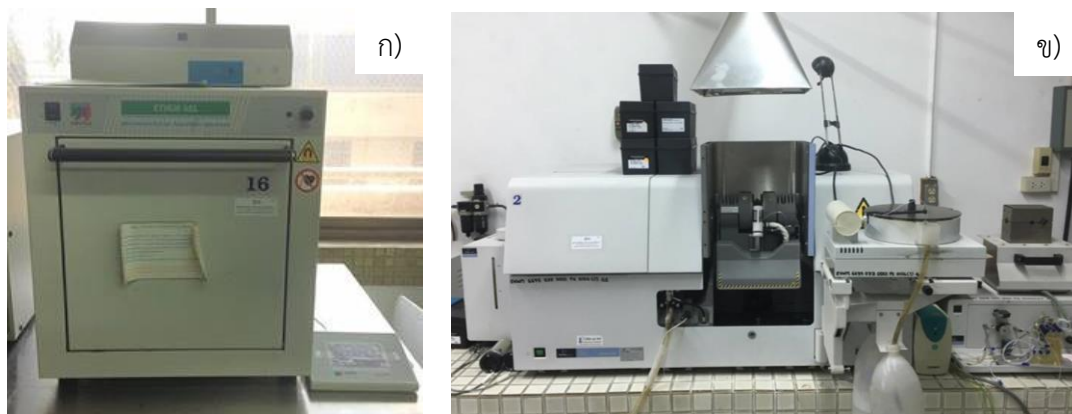
3.2.3 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- 1) เครื่องแก้วสำหรับวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่
 - (1) ปิเปต (Pipet)
 - (2) ปีกเกอร์ (Beaker)

- (3) กรวยกรอง (Funnel)
 - (4) แท่งแก้ว (Glass rod)
 - (5) กระจกบอทวง (Cylinder)
 - (6) กระจกนาฬิกา (Watch glass)
 - (7) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
 - (8) ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
- 2) กระดาษฟรอยด์
 - 3) พาราฟิล์ม (Parafilm)
 - 4) ชุดกรองบูชเนอร์ (Buchner filtration)
 - 5) ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)
 - 6) โถแก้วดูดความชื้น (Desiccator)
 - 7) ขวดพลาสติก สำหรับใส่สารละลายสกัดขนาด 60 มิลลิลิตร
 - 8) กระดาษกรองเบอร์ 40 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร (Whatman, England)
 - 9) กระดาษกรอง GF/C (Whatman Glass micro filters) เส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร

3.2.4 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

- 1) เครื่องบดตัวอย่างพืช (Blender) รุ่น RT04A, Korea
- 2) ตู้อบความร้อน (Hot air oven) รุ่น ULE 500, MEMMERT
- 3) ปืนดูดอากาศ รุ่น N035AN, 18-IP20
- 4) เตาไฟฟ้า (Hot plate) รุ่น Cimarec 2, Thermolyne
- 5) ตู้ดูดควันสารเคมี (Chemical flame hood) รุ่น Wiwatsan
- 6) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC Meter) รุ่น Sension2, HACH
- 7) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter) รุ่น Sension2, HACH
- 8) เครื่องวัดค่าศักย์ภาพออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP Meter) รุ่น Sension2, HACH
- 9) เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical balance) พิกัด 220 กรัม รุ่น BP 221S, Sartorius สำหรับชั่งน้ำหนักตัวอย่าง และชั่งน้ำหนักสารเคมี
- 10) เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยไมโครเวฟ (Microwave digestion) รุ่น ETHOS SEL, MILESTONE (ดังรูปที่ 3.3 ก)
- 11) เครื่องอะตอมมิคแอปซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) รุ่น Analyst 800, Perkin Elmer (ดังรูปที่ 3.3 ข)



รูปที่ 3.3 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

ก) เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยไมโครเวฟ (Microwave digestion) รุ่น ETHOS SEL, MILESTONE และ ข) เครื่องอะตอมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) รุ่น Analyst 800, Perkin Elmer

3.2.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

- 1) แคดเมียมไนเตรทเทตระไฮเดรท ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
- 2) เอทิลีนไดเอมีนเทตระอะซีติกเอซิด ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8$)
- 3) ไนทริโลไทรอะซีติกเอซิด ($\text{C}_6\text{H}_9\text{NO}_6$)
- 4) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% H_2O_2)
- 5) ไนตริกเอซิด (65% HNO_3)

3.3 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

การดำเนินการทดลองนั้นได้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม และ 2) การศึกษาและทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมด้วยการเติมสารคีเลตในชุดทดลอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.3.1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม

- 1) การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการเตรียมสารละลายจากสารประกอบแคดเมียมไนเตรทเทตระไฮเดรท (Cadmiumnitrate tetrahydrate; $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ใช้ศึกษาเท่ากับ 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

(ppm) และใช้ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์จำนวน 1.2 ลิตรต่อหนึ่งภาชนะปลูก (ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ)

2) การเตรียมภาชนะปลูก

ใช้ภาชนะพลาสติกขนาด 1.5 ลิตร จำนวน 36 ใบ ทำการแช่ด้วยกรดไนตริก 10 เปอร์เซ็นต์ นาน 1 วัน แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด 2 ครั้ง และน้ำกลั่น 1 ครั้ง จากนั้นนำภาชนะไปผึ่งให้แห้ง และบรรจุในกล่องทึบแสง

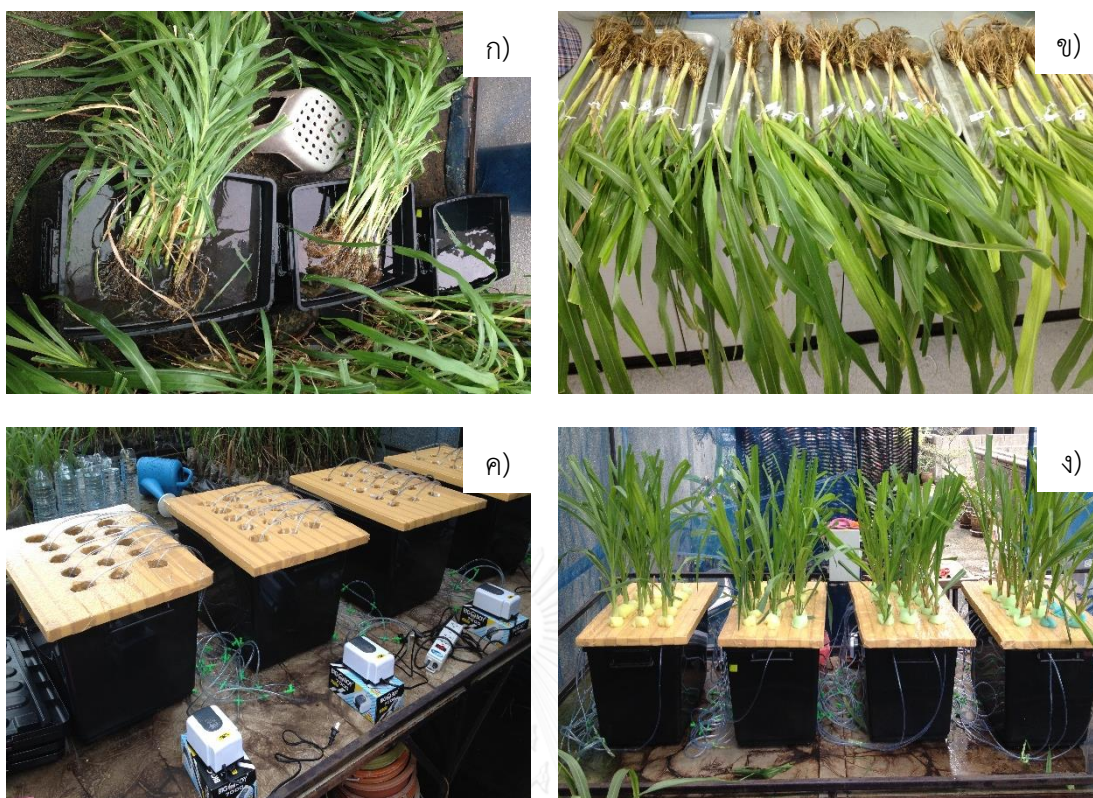
3) การเตรียมพืชทดลอง

พืชที่ใช้ในการวิจัย คือ หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) ได้จากการขยายพันธุ์ด้วยวิธีการปักชำ

3.1) ทำการสุ่มตัวอย่างหญ้าเนเปียร์แคระในพื้นที่ที่ไม่มีการปนเปื้อนแคดเมียม โดยทำการสุ่มตัวอย่างจำนวน 3 ต้น เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณการสะสมแคดเมียมก่อนทำการปลูกทดลอง ด้วยวิธีการของ United State Environmental Protection Agency (USEPA) Method 3052 (USEPA, 1996) เป็นการย่อยด้วยกรดไนตริก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Acid digestion) ด้วยเครื่องไมโครเวฟ (Microwave) แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิค แอปซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer; AAS) จากผลการวิเคราะห์ไม่พบปริมาณแคดเมียมทั้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) แสดงให้เห็นว่า หญ้าเนเปียร์แคระที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีการปนเปื้อนแคดเมียม

3.2) ทำการคัดเลือกกิ่งพันธุ์ที่มีขนาด และความยาวใกล้เคียงกันนำมาปักชำในดิน จากนั้นดูแลรักษาให้น้ำทุกวันประมาณ 2 เดือน ในโรงเรือนเพาะชำ

3.3) คัดเลือกต้นที่มีขนาดลำต้น ราก และน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน น้ำหนักหญ้าเนเปียร์แคระอยู่ในช่วงประมาณ 40-45 กรัม จำนวน 36 ต้น นำพืชมาล้างน้ำให้สะอาดก่อนย้ายลงปลูกในภาชนะทดลองที่เตรียมไว้ ที่มีสารละลายแคดเมียมจากสารประกอบแคดเมียมไนเตรทเทตระไฮเดรท ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้นของแคดเมียมที่ใช้ศึกษาเท่ากับ 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ทั้งนี้ต้นหญ้าเนเปียร์แคระได้ทำการหุ้มลำต้นพืชด้วยฟองน้ำให้พอดีกับภาชนะทดลองเพื่อช่วยพยุงลำต้นของหญ้าเนเปียร์แคระไม่ให้ล้มหรือร่วงลงไปในสารละลาย ส่วนการดูแลรักษาในแต่ละภาชนะได้มีการติดตั้งเครื่องเติมอากาศในน้ำ และมีการสังเกตระดับน้ำในภาชนะทดลอง เมื่อลดลงจะมีการเติมน้ำเพื่อรักษาปริมาตรให้เท่ากับ 1.2 ลิตร ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพรวมในการดำเนินการทดลอง ก) การทำความสะอาดพืชทดลอง ข) หล้าเนเปียร์แคะพร้อมป้ายชื่อ ค) อุปกรณ์การทดลอง และ ง) หล้าเนเปียร์แคะเมื่อปลูกในภาชนะทดลองที่เตรียมไว้

4) การเก็บข้อมูลการเติบโต

การเก็บข้อมูลการเติบโต ด้วยการจดบันทึกจากน้ำหนักสดของพืชก่อนทดลอง และน้ำหนักแห้งหลังเก็บตัวอย่างพืช สังเกตและบันทึกอาการผิดปกติจากความเป็นพิษของแคดเมียม ในวันที่ 1, 7, 15, 22 และ 30 ของการทดลอง และทำการเก็บตัวอย่างพืช และน้ำ หลังจากใส่สารแคดเมียม เป็นเวลา 30 วัน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1) อัตราการเติบโต (Relative growth rate; RGR) สามารถหาได้จากสูตร Hoffmann และ Poorter (2002)

$$RGR = [\ln(W_2) - \ln(W_1)] / (t_2 - t_1)$$

เมื่อ RGR = อัตราการเจริญเติบโต (กรัมต่อวัน)

W_1 = น้ำหนักแห้งของพืชที่เวลาเริ่มทดลอง (กรัม)

W_2 = น้ำหนักแห้งของพืชที่เวลาหลังทดลอง (กรัม)

T_1 = เวลาเริ่มทดลอง (วัน)

T_1 = เวลาหลังทดลอง (วัน)

\ln = Natural logarithm

4.2) เปอร์เซ็นต์การเติบโต สามารถหาได้จากสูตร (กัลปพฤกษ์ คงเมือง, 2553)

$$\frac{(\text{น้ำหนักสดของพืชในแต่ละช่วงระยะเวลา} - \text{น้ำหนักของพืชเมื่อเริ่มการทดลอง}) \times 100}{\text{น้ำหนักของพืชเมื่อเริ่มการทดลอง}}$$

5) การวิเคราะห์ตัวอย่าง

5.1) การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of hydrogen ion; pH) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential; ORP) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) และปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid; TSS)

5.2) การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในตัวอย่างพืชด้วยวิธีการของ USEPA method 3052 (USEPA, 1996) และวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในน้ำด้วยวิธีการของ USEPA method 3051 (USEPA, 1998) ทำการวิเคราะห์เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาทดลองครบที่ 30 วัน โดยการแยกวิเคราะห์เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนได้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)

6) การประมวลผลการศึกษาเบื้องต้น

6.1) วิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในหญ้าเนเปียร์แคระ และในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารละลายแคดเมียมจากสารประกอบแคดเมียมไนเตรทเทตระไฮเดรต (Cadmiumnitrate tetrahydrate; $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ใช้ศึกษาเท่ากับ 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) การวิเคราะห์และประมวลผลการศึกษาเบื้องต้นเพื่อนำระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

6.2) วิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษของพืชที่ได้รับ (Phytotoxicity หรือ Plant injury) ภายหลังจากใส่สารละลายแคดเมียม ในวันที่ 1, 7, 15, 22 และ 30 ของการทดลอง ทำการประเมินจากการสังเกตพืชด้วยสายตา โดยรายละเอียดของเกณฑ์การให้น้ำหนักคะแนน ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ทำการประเมินความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระด้วยสายตาภายหลังจากการใส่สารละลายแคดเมียม นำผลการประเมินความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การแสดงความพิษ โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

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

- เมื่อ A_0 คือ จำนวนใบของลักษณะพืชปกติ ไม่มีการเปลี่ยนสีของใบ
- A_1 คือ จำนวนใบที่เกิดลักษณะแผ่นใบเริ่มมีสีเหลืองหรือเหลืองซีด ไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์
- A_2 คือ จำนวนใบที่เกิดลักษณะเป็นพิษเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แผ่นใบมีสีเหลืองหรือเหลืองซีดไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์
- A_3 คือ จำนวนใบที่เกิดลักษณะเป็นพิษต่อพืชเพิ่มมากขึ้น แผ่นใบมีสีเหลืองหรือไหม้ไม่เกิน 60 เปอร์เซ็นต์
- A_4 คือ จำนวนใบที่เกิดลักษณะเป็นพิษต่อพืชรุนแรง แผ่นใบเหลืองหรือไหม้เกือบทั้งแผ่นใบไม่เกิน 80 เปอร์เซ็นต์
- A_5 คือ จำนวนใบที่เกิดลักษณะเป็นพิษต่อพืชรุนแรงมาก แผ่นใบเหลืองหรือไหม้ทั้งแผ่นใบมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์
- A_r คือ จำนวนใบทั้งหมด
- B_0 คือ คะแนนความเป็นพิษ 0 คะแนน
- B_1 คือ คะแนนความเป็นพิษ 1 คะแนน
- B_2 คือ คะแนนความเป็นพิษ 2 คะแนน
- B_3 คือ คะแนนความเป็นพิษ 3 คะแนน
- B_4 คือ คะแนนความเป็นพิษ 4 คะแนน
- B_5 คือ คะแนนความเป็นพิษ 5 คะแนน
- B_r คือ คะแนนความเป็นพิษ 5 คะแนน

ตารางที่ 3.1 เกณฑ์การประเมินความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ โดยการสังเกตด้วยสายตาภายหลังการใส่สารละลายแคดเมียม

ระดับความเป็นพิษ (คะแนน)	ลักษณะที่พืชทดลองแสดงอาการ
0	พืชปกติ ไม่มีการเปลี่ยนสีของแผ่นใบ
1	เป็นพิษต่อพืชเล็กน้อย แผ่นใบเริ่มมีสีเหลืองหรือสีเหลืองซีด
2	เป็นพิษต่อพืชเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แผ่นใบมีสีเหลืองหรือสีเหลืองซีด
3	เป็นพิษต่อพืชเพิ่มมากขึ้น แผ่นใบมีสีเหลืองหรือไหม้
4	เป็นพิษต่อพืชรุนแรง แผ่นใบมีสีเหลืองหรือไหม้เกือบทั้งแผ่นใบ
5	เป็นพิษต่อพืชรุนแรงมาก แผ่นใบมีสีเหลืองหรือไหม้ทั้งแผ่นใบ

หมายเหตุ : เกณฑ์การประเมินความเป็นพิษของพืชดัดแปลงมาจาก Brown et al. (1991) และสุภาพร แป้งทา (2552)

3.3.2 การศึกษาและทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมด้วยการเติมสารคีเลตในชุดทดลอง

1) การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการเตรียมสารละลายจากสารประกอบแคดเมียมไนเตรทเทตระไฮเดรต (Cadmium nitrate tetrahydrate; $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้น และใช้ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์จำนวน 1.2 ลิตร ต่อหนึ่งภาชนะปลูก โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 5 ชุดการทดลอง (ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ) ดังนี้

1.1) ชุดการทดลองที่ 1 คือ ชุดควบคุม ไม่มีการเติมสารละลายแคดเมียม

1.2) ชุดการทดลองที่ 2 คือ ชุดควบคุม ไม่มีการเติมสารคีเลต

1.3) ชุดการทดลองที่ 3 เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 และ 1 โมล

1.4) ชุดการทดลองที่ 4 เติมสารเอนทีเอ (NTA) ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 และ 1 โมล

1.5) ชุดการทดลองที่ 5 เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ร่วมกันในอัตราส่วน 1:1 ที่ระดับความเข้มข้นชนิดละ 0.25 และ 0.5 โมล

2) การเตรียมภาชนะปลูก

ใช้ภาชนะพลาสติกทึบแสงขนาด 1.5 ลิตร จำนวน 192 ใบ ทำการแช่ด้วยกรดไนตริก 10 เปอร์เซ็นต์ นาน 1 วัน แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด 2 ครั้ง และน้ำกลั่น 1 ครั้ง จากนั้นนำภาชนะไปผึ่งให้แห้ง

3) การเตรียมสารละลายคีเลต

ทำการเตรียมสารเอทิลีนไดเอมีนเทตระอะซีติก (Ethylenediaminetetraacetic acid; EDTA) และสารไนตริโลไตรอะซีติก (Nitrilotriacetic acid; NTA) โดยใช้ปริมาณ EDTA ที่ 0.5 และ 1 โมล และใช้ปริมาณ NTA ที่ 0.5 และ 1 โมล

4) การเตรียมพืชทดลอง

พืชที่ใช้ในการวิจัย คือ หญ้าเนเปียร์แคระ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) ได้จากการขยายพันธุ์ด้วยวิธีการปักชำ

4.1) ทำการคัดเลือกกิ่งพันธุ์ที่มีขนาด และความยาวใกล้เคียงกันนำมาปักชำในดิน น้ำหนักพืชอยู่ในช่วงประมาณ 40-45 กรัม จากนั้นดูแลรักษาให้น้ำทุกวันประมาณ 2 เดือน ในโรงเรือนเพาะชำ

4.2) คัดเลือกต้นที่มีขนาดลำต้น ราก และน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน จำนวน 192 ต้น นำมาล้างน้ำให้สะอาดก่อนย้ายลงปลูกในภาชนะทดลองที่เตรียมไว้ ที่มีสารละลายแคดเมียมจากสารประกอบแคดเมียมไนเตรทเทตระไฮเดรต ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ใช้ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม

ที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้น ทั้งนี้ต้นหญ้าเนเปียร์แคะได้ทำการหุ้มลำต้นพืชด้วยฟองน้ำให้พอดีกับภาชนะทดลองเพื่อช่วยพยุงลำต้นของหญ้าเนเปียร์แคะไม่ให้ล้มหรือร่วงลงไปในการละลาย ส่วนการดูแลรักษาในแต่ละภาชนะได้มีการติดตั้งเครื่องเติมอากาศในน้ำ และมีการสังเกตระดับน้ำในภาชนะทดลอง เมื่อทดลองจะมีการเติมน้ำเพื่อรักษาปริมาตรให้เท่ากับ 1.2 ลิตร ตลอดระยะเวลาของการทดลอง

5) การเก็บตัวอย่าง

5.1) การเก็บตัวอย่างน้ำ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำ ทุก ๆ 15 วัน ของการทดลอง หรือทำการเก็บตัวอย่างในวันที่ 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน ทำการเก็บใส่ขวดปริมาตร 200 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด โดยขวดแรกนำไปวิเคราะห์หาคุณภาพน้ำ พารามิเตอร์ที่ใช้ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of hydrogen ion; pH) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential; ORP) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) และ ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid; TSS) สำหรับขวดที่สองทำการปรับ pH ด้วยการใส่กรดไนตริก 65 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 2-3 หยด นำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total cadmium)

5.2) เก็บตัวอย่างพืช โดยเก็บตัวอย่างหญ้าเนเปียร์แคะ วันที่ 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน นำมาล้างน้ำให้สะอาด 3-4 ครั้ง ล้างน้ำกลั่น 1 ครั้ง จากนั้นนำมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 2-3 ชั่วโมง และนำมาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือลำต้น (ลำต้นและใบ) ชั่งน้ำหนักสด และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นทำการบดพืชตัวอย่างแบบแยกส่วนให้ละเอียด และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด

5.3) การเก็บข้อมูลการเติบโตของพืช โดยจดบันทึกการเติบโตด้วยการชั่งน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของพืชในแต่ละช่วงเวลา และทำการคำนวณอัตราการเติบโตทุก ๆ 15 วัน ของการทดลอง หรือในวันที่ 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน

5.4) การเก็บตัวอย่างพืชเพื่อวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอน (Synchrotron) โดยเก็บตัวอย่างหญ้าเนเปียร์แคะที่ 30 และ 105 วัน (ช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง) นำมาล้างน้ำให้สะอาด 3-4 ครั้ง ล้างน้ำกลั่น 1 ครั้ง นำมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 2-3 ชั่วโมง จากนั้นทำการเก็บและรักษาตัวอย่างพรรณไม้ (Herbarium) โดยใช้กระดาษพับครึ่งสำหรับวางตัวอย่างหญ้าเนเปียร์แคะที่จะอัดบนแผงอัดพรรณไม้ (Plant press) ขนาด 30 x 50 เซนติเมตร นำไปตากแดด โดยการตั้งแผงอัดพรรณไม้ขึ้นเป็นเวลา 3-5 วัน จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอน (Synchrotron) ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การเก็บตัวอย่างพืชเพื่อวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอน (Synchrotron)
 ก) แผงอัดพรรณไม้ (Plant press) ขนาด 95 x 150 เซนติเมตร ข) หล้าเนเปียร์แคะที่ถูกอัดจาก
 แผงอัดพรรณไม้ และ ค) การเตรียมตัวอย่างวิเคราะห์แสงซินโครตรอน

6) การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ และพืช

6.1) การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างน้ำ ใช้วิธีการของ USEPA method 3051A (USEPA, 1998) โดยการย่อยด้วยกรด (Acid digestion) ด้วยเครื่องมือสำหรับย่อยระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) และตรวจวัดหาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer; AAS)

6.2) การวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่สะสมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหล้าเนเปียร์แคะ ใช้วิธีการของ USEPA method 3052 (USEPA, 1996) โดยการย่อยด้วยกรด (Acid digestion) ด้วยเครื่องมือสำหรับย่อยระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion) และตรวจวัดหาปริมาณแคดเมียมทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิคแอปซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer; AAS)

6.3) การวิเคราะห์หาค่าศักยภาพในการสะสมทางชีวภาพของสิ่งมีชีวิต Bioaccumulation factor (BCF) สามารถคำนวณได้จากสูตร (Lu และคณะ, 2004) ดังนี้

$$\text{ศักยภาพในการสะสมทางชีวภาพ} = \frac{\text{ปริมาณความเข้มข้นในตัวอย่างพืช (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)}}{\text{ปริมาณความเข้มข้นในน้ำเสียสังเคราะห์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)}}$$

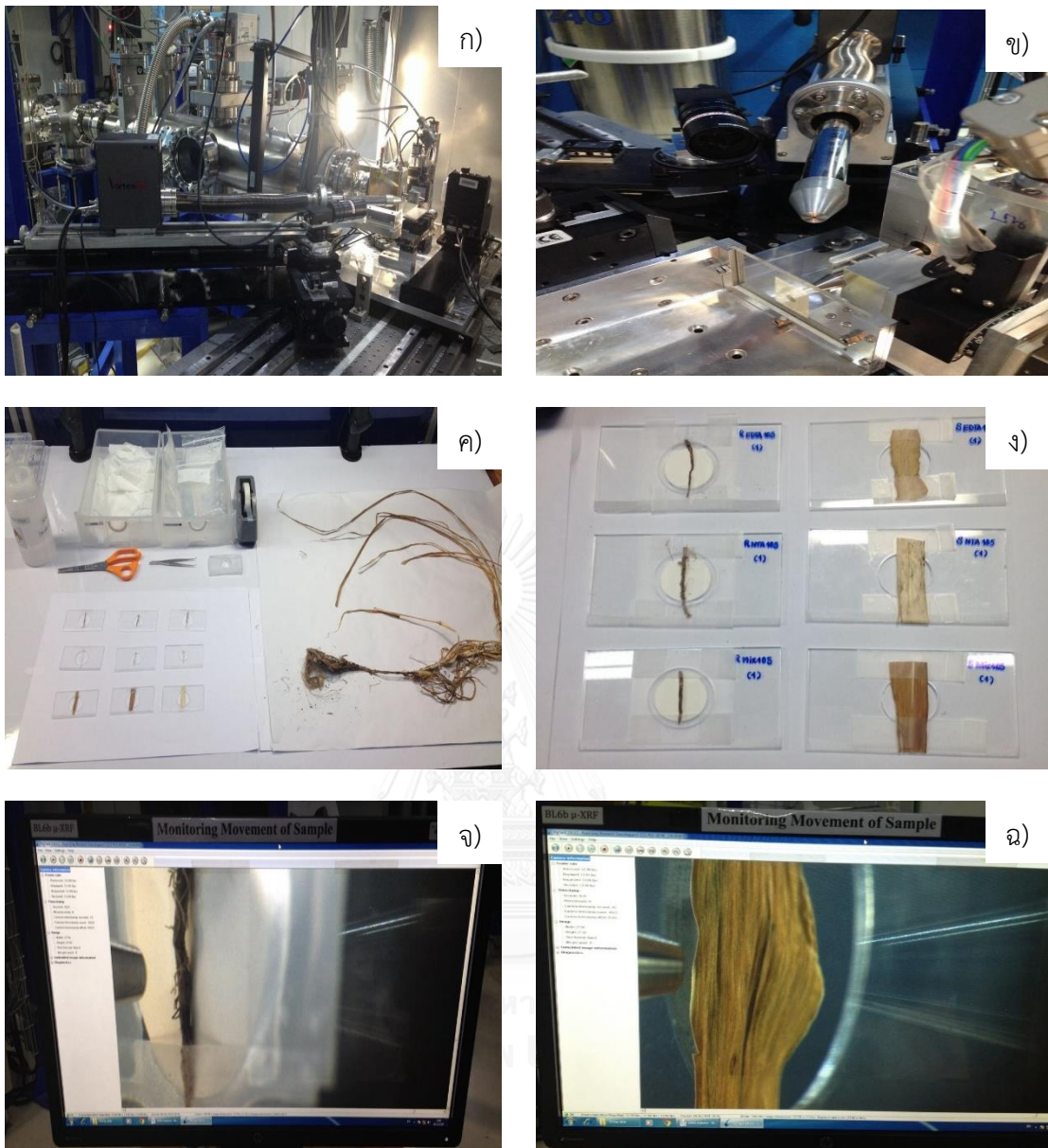
6.4) การวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมของพืช และการลำเลียงแคดเมียมของพืชในแต่ละชุดการทดลอง Translocation factor (TF) สามารถคำนวณได้จากสูตร (Zacchini และคณะ, 2009) ดังนี้

$$\text{Translocation factor} = \frac{\text{ปริมาณการดูดตั้งโลหะในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)}}{\text{ปริมาณการดูดตั้งโลหะในส่วนใต้น้ำ (ราก)}}$$

6.5) การวิเคราะห์การเคลื่อนย้ายแคดเมียมไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืชด้วยแสงซินโครตรอน (Synchrotron) ซึ่งเป็นการศึกษาการกระจายตัว การส่งผ่าน และการสะสมแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของพืชโดยใช้ระบบลำแสงที่ 6 (BL6b) (สถาบันแสงวิจัยซินโครตรอน, 2559) ด้วยเทคนิค micro-XRF/XRD โดยใช้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์ครอบคลุมตั้งแต่พลังงาน 2-10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) จากแม่เหล็กสองขั้วของวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาด 1.2 จิกะอิเล็กตรอนโวลต์ (GeV) ทำการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมและตรวจวัดการสะสมของแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ด้วยโครงสร้างการเรืองแสงด้วยรังสีเอกซ์จากแสงซินโครตรอน (Synchrotron) โดยมีหลักการทำงาน คือ การกระเจิงรังสีเอกซ์อาศัยหลักการของ Bragg เมื่อรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยวตกกระทบผลึกหรือโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมอย่างมีระเบียบ เกิดการสะท้อนบนระนาบของผลึก และเมื่อผลต่างของระยะทางเดินของรังสีเอกซ์มีค่าเท่ากับจำนวนเท่า (n) ของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (λ) ทำให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนของห้วงที่ซึ่งรูปแบบดังกล่าวเรียกว่า Diffraction pattern ดังนั้นเมื่อทราบความยาวคลื่น และวัดมุมที่เกิดการเลี้ยวเบน (q) ก็สามารถคำนวณหาค่าระยะระหว่างระนาบของผลึกได้ (d) โดยปรากฏการณ์การเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence) เกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนชั้นในของอะตอมถูกกระตุ้นให้หลุดออกมา และเกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนในชั้นถัดมา ทำให้เกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ โดยที่รังสีเอกซ์ที่คายออกมานั้นจะมีคุณลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละธาตุ ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการหาค่าประกอบทางอะตอมของสารตัวอย่างได้ ดังรูปที่ 3.6

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลปริมาณการดูดตั้งและสะสมแคดเมียมที่ได้จากการทดลองปลูกหญ้าเนเปียร์แคระในน้ำที่ปนเปื้อนแคดเมียม โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติดังกล่าวโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติคือ Statistical Package for the Social Science (SPSS)



รูปที่ 3.5 การวิเคราะห์การเคลื่อนย้ายแคดเมียมไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืชด้วยแสงซินโครตรอน
 ก) ระบบลำแสงที่ 6 (BL6b) ข) หัว beam shutter ของระบบลำแสงที่ 6 (BL6b)
 ค) การเตรียมตัวอย่างพืช ง) ตัวอย่างพืชที่พร้อมตรวจวัด จ) ภาพจากจอมอนิเตอร์ในส่วนรากของ
 หน่อเนเปียร์แคระ และ ฉ) ภาพจากจอมอนิเตอร์ในส่วนใบของหน่อเนเปียร์แคระ

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

การศึกษาผลของสาร EDTA และ NTA ต่อการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม และ 2) การศึกษาผลของสาร EDTA และ NTA ต่อการดูดซับแคดเมียมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ โดยได้ทำการศึกษาการเจริญเติบโต การแสดงความเป็นพิษ และปริมาณการดูดซับแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 ผลการศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม

การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม ได้ทำการทดลองระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) โดยใช้ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 1.2 ลิตร และปลูกหญ้าเนเปียร์แคระเป็นระยะเวลา 30 วัน และทำการวัดสมบัติของน้ำวันแรกของการทดลอง นอกจากนี้ทำการเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระ ในวันที่ 1, 7, 15, 22 และ 30 วันของการทดลอง เมื่อสิ้นสุดการทดลองนำตัวอย่างพืช และน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total cadmium) สามารถสรุปผลการศึกษาในเบื้องต้นได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำเสียสังเคราะห์

1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of hydrogen ion; pH) ในน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 1.2 ลิตรต่อภาชนะทดลอง โดยทำการเติมสารละลายแคดเมียมไนเตรทเทตระไฮเดรท (Cadmiumnitrate tetrahydrate; $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) พบว่า เมื่อทำการตรวจวัด ในวันที่ 1 ของการทดลอง ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ทุกระดับความเข้มข้นมีค่าอยู่ในช่วง 6.37-6.60 หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.60 ± 0.10 , 6.60 ± 0.02 , 6.56 ± 0.01 , 6.57 ± 0.02 , 6.57 ± 0.08 , 6.57 ± 0.02 , 6.55 ± 0.04 , 6.54 ± 0.03 , 6.52 ± 0.03 , 6.48 ± 0.04 , 6.45 ± 0.06 และ 6.37 ± 0.02 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.1) ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างที่ความเข้มข้นของแคดเมียมต่างกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปริมาณแคดเมียมที่เติมลงไปมีปริมาณน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรน้ำทั้งหมดจึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำเสียสังเคราะห์ ภายหลังจากปลูกพืชทดลองสิ้นสุดที่ระยะเวลา 30 วัน และทำการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง พบว่า มีแนวโน้มลดลงเท่ากับ 6.52 ± 0.03 , 6.51 ± 0.04 , 6.52 ± 0.03 , 6.54 ± 0.03 ,

6.56±0.03, 6.52±0.03, 6.51±0.05, 6.52±0.04, 6.42±0.04, 6.40±0.05, 6.37±0.05 และ 6.31±0.06 ตามลำดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หรืออยู่ในช่วง 6.31-6.56 หากแต่ไม่มีความแตกต่างจากค่าเริ่มต้นของวันแรกที่ทำการทดลอง (ดังตารางที่ 4.1) ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างที่ลดลงนั้นตั้งแต่ 0-30 วัน หลังจากมีการปลูกหญ้าเนเปียร์แคะลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์ แล้วทำให้พืชดูดดึงแคดเมียมไปสะสมไว้ในพืชได้จึงทำให้ปริมาณแคดเมียมในเตรทเทรไฮเดรทในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลง และส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างที่อาจลดลงบ้างเล็กน้อย อีกทั้งจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ และรากของหญ้าเนเปียร์แคะสามารถช่วยย่อยสลายเศษซากต่าง ๆ จึงอาจทำให้เกิดสภาวะกรดอ่อน ๆ ในน้ำ แม้มีปริมาณไม่มากแต่ก็อาจส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าลดลง (กัลปพฤกษ์ คงเมือง, 2553)

ตารางที่ 4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of hydrogen ion; pH) ในน้ำเสียสังเคราะห์

ระดับ แคดเมียม (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of hydrogen ion; pH)				
	1 (วัน)	7 (วัน)	15 (วัน)	22 (วัน)	30 (วัน)
	0	6.60 ^a ±0.10	6.52 ^{ab} ±0.03	6.51 ^a ±0.03	6.51 ^a ±0.04
5	6.60 ^a ±0.02	6.53 ^{ab} ±0.06	6.51 ^a ±0.04	6.53 ^a ±0.06	6.51 ^a ±0.04
10	6.56 ^{ab} ±0.01	6.54 ^{ab} ±0.02	6.55 ^a ±0.04	6.54 ^a ±0.02	6.52 ^a ±0.03
20	6.57 ^{ab} ±0.02	6.53 ^{ab} ±0.06	6.54 ^a ±0.07	6.54 ^a ±0.06	6.54 ^a ±0.03
30	6.57 ^{ab} ±0.08	6.57 ^b ±0.06	6.55 ^a ±0.07	6.56 ^a ±0.07	6.56 ^a ±0.03
40	6.57 ^a ±0.02	6.57 ^b ±0.05	6.53 ^a ±0.05	6.53 ^a ±0.05	6.52 ^a ±0.03
50	6.55 ^{ab} ±0.04	6.55 ^{ab} ±0.04	6.53 ^a ±0.02	6.54 ^a ±0.04	6.51 ^a ±0.05
60	6.54 ^{ab} ±0.03	6.53 ^{ab} ±0.05	6.53 ^a ±0.04	6.51 ^a ±0.02	6.52 ^a ±0.04
70	6.52 ^{bc} ±0.03	6.51 ^{bc} ±0.04	6.49 ^a ±0.03	6.49 ^a ±0.04	6.42 ^b ±0.04
80	6.48 ^{bc} ±0.04	6.48 ^{bc} ±0.04	6.47 ^a ±0.09	6.40 ^b ±0.04	6.40 ^b ±0.05
90	6.45 ^c ±0.06	6.43 ^{cd} ±0.05	6.37 ^b ±0.05	6.35 ^b ±0.06	6.37 ^{bc} ±0.05
100	6.37 ^d ±0.02	6.39 ^d ±0.04	6.36 ^b ±0.05	6.37 ^b ±0.05	6.31 ^c ±0.06

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)

2) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละลายแคดเมียมไนเตรทเทตระไฮเดรท (Cadmiumnitrate tetrahydrate; $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0-100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) และตรวจวัดในวันแรกของการทดลอง พบว่า ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง 1,515.00-1,643.67 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตรหรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,515.00 \pm 8.72$, $1,622.67 \pm 5.51$, $1,600.67 \pm 7.37$, $1,598.67 \pm 3.51$, $1,611.00 \pm 7.21$, $1,632.33 \pm 3.06$, $1,619.67 \pm 8.62$, $1,601.00 \pm 6.93$, $1,609.67 \pm 4.51$, $1,650.67 \pm 4.16$, $1,608.67 \pm 7.64$ และ $1,643.67 \pm 4.93$ ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.2) และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 30 วัน ทำการตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้า พบว่า มีค่าเท่ากับ $1,303.00 \pm 8.19$, $1,294.00 \pm 10.15$, $1,297.00 \pm 11.36$, $1,294.67 \pm 9.87$, $1,291.00 \pm 7.94$, $1,285.67 \pm 10.69$, $1,292.33 \pm 5.03$, $1,282.00 \pm 10.54$, $1,284.67 \pm 8.62$, $1,263.33 \pm 8.50$, $1,252.33 \pm 11.93$ และ $1,263.33 \pm 7.51$ ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หรืออยู่ในช่วง $1,252.33$ - $1,303.00$ ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (ดังตารางที่ 4.2) เมื่อทำการพิจารณาค่าการนำไฟฟ้า พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0-100 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นมีแนวโน้มลดลง ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น สำหรับระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าอยู่ในช่วง $1,611.00$ - $1,291.00$ ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตรหรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,611.00 \pm 7.21$, $1,605.67 \pm 2.08$, $1,412.67 \pm 8.62$, $1,303.33 \pm 8.50$ และ $1,291.00 \pm 7.94$ ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับของวันที่ทำการเก็บตัวอย่าง ส่วนระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าอยู่ในช่วง $1,643.67$ - $1,263.33$ ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตรหรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,643.67 \pm 4.93$, $1,669.33 \pm 7.09$, $1,602.67 \pm 3.06$, $1,283.00 \pm 4.58$ และ $1,263.33 \pm 7.51$ ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับวันที่ทำการเก็บตัวอย่าง 1-30 วัน ซึ่งระดับความเข้มข้นที่ 30 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการนำไฟฟ้าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนที่ระยะเวลา 30 วันของการทดลอง และค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ของแต่ละช่วงเวลาที่ทำการทดลอง โดยหญ้าเนเปียร์แคะมีการดูดดึงแคดเมียม และนำไปสะสมไว้ในส่วนของพืชส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์มีประจุน้อยลง จึงส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงด้วยเช่นกัน (กัลย์สุตา ปิ่นพา, 2557)

ตารางที่ 4.2 ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) ในน้ำเสียสังเคราะห์

ระดับ แคดเมียม (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC; $\mu\text{S}/\text{cm}$)				
	1 (วัน)	7 (วัน)	15 (วัน)	22 (วัน)	30 (วัน)
0	1,515.00 ^a ±8.72	1,563.67 ^b ±3.51	1,388.67 ^c ±6.43	1,326.67 ^d ±6.66	1,303.00 ^e ±8.19
5	1,622.67 ^a ±5.51	1,643.00 ^b ±6.08	1,389.33 ^c ±5.51	1,300.33 ^d ±2.89	1,294.00 ^d ±10.15
10	1,600.67 ^a ±7.37	1,618.00 ^b ±7.55	1,407.33 ^c ±2.08	1,304.67 ^d ±7.77	1,297.00 ^d ±11.36
20	1,598.67 ^a ±3.51	1,607.00 ^b ±7.00	1,386.00 ^b ±8.89	1,308.00 ^c ±10.82	1,294.67 ^c ±9.87
30	1,611.00 ^a ±7.21	1,605.67 ^a ±2.08	1,412.67 ^b ±8.62	1,303.33 ^c ±8.50	1,291.00 ^c ±7.94
40	1,632.33 ^a ±3.06	1,594.33 ^b ±9.29	1,402.33 ^c ±8.14	1,309.00 ^d ±7.55	1,285.67 ^c ±10.69
50	1,619.67 ^a ±8.62	1,583.33 ^b ±4.93	1,396.67 ^c ±7.09	1,294.67 ^d ±9.29	1,292.33 ^d ±5.03
60	1,601.00 ^a ±6.93	1,610.33 ^b ±9.29	1,579.33 ^c ±6.43	1,291.33 ^d ±8.74	1,282.00 ^d ±10.54
70	1,609.67 ^a ±4.51	1,652.00 ^b ±4.58	1,574.33 ^c ±10.97	1,300.33 ^d ±9.71	1,284.67 ^d ±8.62
80	1,650.67 ^a ±4.16	1,661.00 ^b ±9.17	1,615.00 ^c ±7.21	1,297.33 ^d ±8.08	1,263.33 ^e ±8.50
90	1,608.67 ^a ±7.64	1,638.67 ^b ±7.23	1,601.33 ^c ±9.29	1,293.67 ^d ±9.61	1,252.33 ^e ±11.93
100	1,643.67 ^a ±4.93	1,669.33 ^b ±7.09	1,602.67 ^c ±3.06	1,283.00 ^d ±4.58	1,263.33 ^e ±7.51

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างระยะเวลาในการทดลอง โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)

3) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential; ORP) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละลายแคดเมียมในน้ำที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 0-100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) และตรวจวัดค่าในวันที่ 1 ของการทดลอง พบว่า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน มีค่าอยู่ในช่วง 225.37-258.33 มิลลิโวลต์หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 225.37 ± 10.58 , 243.63 ± 7.68 , 258.33 ± 6.53 , 254.43 ± 1.68 , 249.37 ± 5.96 , 237.40 ± 0.56 , 243.53 ± 6.75 , 229.93 ± 0.60 , 231.33 ± 0.31 , 230.13 ± 0.91 , 230.70 ± 1.87 และ 225.23 ± 6.56 มิลลิโวลต์ ตามลำดับของระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ (ดังตารางที่ 4.3) และเมื่อสิ้นสุดการปลูกพืชทดลองที่ 30 วัน พบว่า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน มีค่าอยู่ในช่วง 280.40-310.87 มิลลิโวลต์หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 287.87 ± 8.89 , 310.87 ± 32.02 , 284.40 ± 8.46 ,

286.80±9.34, 291.27±6.12, 288.27±10.53, 282.10±5.94, 289.53±8.53, 297.53±4.55, 287.83±4.17, 280.40±0.82 และ 279.83±4.92 มิลลิโวลต์ ตามลำดับของระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ (ดังตารางที่ 4.3) โดยค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกระดับความเข้มข้นของแคดเมียมตั้งแต่ 0-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tuntullveat (2012) ได้ทำการวัดค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำ ผลการศึกษาพบว่าค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำมีค่าสูงมากในชุดการทดลองทุกชุด โดยน้ำได้รับอิเล็กตรอนจากสารโครเมียม (H_2CrO_4) รวมทั้งสารละลายแคดเมียม (Cd^{2+}) และสารละลายเกลือไดโครเมต ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4.3 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential; ORP) ในน้ำเสียสังเคราะห์

ระดับ แคดเมียม (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential; ORP; mV)				
	1 (วัน)	7 (วัน)	15 (วัน)	22 (วัน)	30 (วัน)
0	225.37 ^a ±10.58	282.93 ^b ±12.78	262.23 ^c ±3.35	299.03 ^d ±3.47	287.87 ^e ±8.89
5	243.63 ^a ±7.68	279.03 ^b ±1.37	268.47 ^c ±8.66	277.63 ^d ±5.42	310.87 ^d ±32.02
10	258.33 ^a ±6.53	264.67 ^b ±5.08	287.53 ^c ±10.40	278.57 ^d ±24.20	284.40 ^d ±8.46
20	254.43 ^a ±1.68	267.97 ^a ±5.69	291.50 ^b ±5.88	276.80 ^c ±11.78	286.80 ^c ±9.34
30	249.37 ^a ±5.96	271.03 ^a ±4.28	286.03 ^b ±0.40	271.40 ^c ±6.15	291.27 ^c ±6.12
40	237.40 ^a ±0.56	266.90 ^b ±6.74	292.17 ^c ±4.19	265.17 ^d ±3.73	288.27 ^e ±10.53
50	243.53 ^a ±6.75	261.23 ^b ±0.96	291.17 ^c ±2.57	268.10 ^d ±4.57	282.10 ^d ±5.94
60	229.93 ^a ±0.60	258.27 ^b ±0.74	295.70 ^c ±6.21	273.30 ^d ±10.18	289.53 ^d ±8.53
70	231.33 ^a ±0.31	252.47 ^b ±1.56	305.63 ^c ±1.34	291.13 ^d ±5.85	297.53 ^d ±4.55
80	230.13 ^a ±0.91	252.83 ^b ±7.03	298.23 ^c ±5.42	297.37 ^d ±4.58	287.83 ^e ±4.17
90	230.70 ^a ±1.87	254.60 ^b ±6.53	289.00 ^c ±3.61	281.73 ^d ±3.61	280.40 ^e ±0.80
100	225.23 ^a ±6.56	249.93 ^b ±3.98	280.17 ^c ±2.14	287.63 ^d ±1.36	279.83 ^e ±4.92

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างระยะเวลาในการทดลอง โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)

4) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid; TSS) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละลายแคลเซียมในน้ำที่ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมเท่ากับ 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ซึ่งจากการตรวจวัดก่อนการปลูกพืชทดลองไม่พบปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในทุกระดับความเข้มข้น หากแต่ภายหลังการปลูกพืชทดลองได้ทำการตรวจวัดที่ 7 วันของการทดลอง พบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 10.44 ± 4.68 , 8.67 ± 0.67 , 16.67 ± 4.37 , 17.56 ± 3.79 , 17.78 ± 3.79 , 18.22 ± 4.91 , 13.78 ± 3.01 , 17.78 ± 5.09 , 16.89 ± 3.67 , 15.56 ± 4.44 , 19.09 ± 11.26 และ 21.33 ± 5.21 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับความเข้มข้นของแคลเซียมในน้ำเสียสังเคราะห์ (ดังตารางที่ 4.4) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกระดับความเข้มข้นของแคลเซียมในน้ำเสียสังเคราะห์แคลเซียมตลอดการทดลอง ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ของแต่ละช่วงเวลาที่ทำการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 30 วันของการทดลอง พบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 44.29 ± 8.04 , 53.77 ± 12.58 , 45.11 ± 7.31 , 48.00 ± 11.02 , 49.84 ± 8.96 , 40.67 ± 7.86 , 42.44 ± 3.67 , 35.78 ± 1.02 , 34.00 ± 2.67 , 55.97 ± 7.06 , 46.89 ± 0.77 และ 47.33 ± 4.37 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับความเข้มข้นของแคลเซียมในน้ำเสียสังเคราะห์ (ดังตารางที่ 4.4) โดยปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาของการทดลอง อาจมีสาเหตุมาจากรากของพืช และเปลือกของหญ้าเนเปียร์แคระ ซึ่งแช่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ และมีการหลุดร่วงปนออกมากับน้ำเสียสังเคราะห์จึงอาจทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น (สุธินิ วดีศิริศักดิ์, 2550)

4.1.2 การเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระในน้ำเสียสังเคราะห์

ผลการศึกษาการเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละลายแคลเซียมที่ระดับความเข้มข้นของแคลเซียมเท่ากับ 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) การทดลองได้คัดเลือกใช้หญ้าเนเปียร์แคระที่มีอายุ 2 เดือน คัดเลือกเฉพาะต้นให้มีขนาดใกล้เคียงกัน และมีน้ำหนักสดประมาณ 40-45 กรัม ซึ่งค่าน้ำหนักสดเฉลี่ยของหญ้าเนเปียร์แคระที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 40.80-45.07 กรัม (ดังตารางที่ 4.5) และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 30 วัน พบว่า ค่าน้ำหนักสดเฉลี่ยของหญ้าเนเปียร์แคระมีค่าอยู่ในช่วง 53.96-107.11 กรัม หรือมีค่าเท่ากับ 107.11, 89.09, 92.46, 86.66, 94.65, 60.40, 58.68, 56.21, 53.96 และ 54.53 กรัม ตามลำดับความเข้มข้นของแคลเซียมที่ทดลอง (ดังตารางที่ 4.5) โดยสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การเติบโตได้ เท่ากับ 142.66, 104.95, 105.15, 93.35 125.41, 39.91, 40.55, 37.77, 22.92 และ 29.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.5) แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของแคลเซียมมากขึ้นส่งผลให้การเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามจากการทดลองครั้งนี้พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารละลายแคลเซียมที่

ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0, 5, 10, 20 และ 30 หรือ 0-30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) พบว่า หย้าเนเปียร์แคระสามารถเติบโตอยู่ได้เป็นปกติ ทั้งนี้หากพิจารณาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) พบว่า ค่าการเติบโตสัมพัทธ์ของหย้าเนเปียร์แคระ มีค่าเท่ากับ 0.40, 0.41, 0.38, 0.23, 0.29, 0.23 และ 0.22 เท่าของน้ำหนักเริ่มต้น ตามลำดับ ความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 40-100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดังตารางที่ 4.5) แสดงให้เห็นถึงความไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของหย้าเนเปียร์แคระในระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ดังกล่าว

ตารางที่ 4.4 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid; TSS) ในน้ำเสียสังเคราะห์

ระดับแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid; TSS; mg/L)				
	1 (วัน)	7 (วัน)	15 (วัน)	22 (วัน)	30 (วัน)
0	1.53 ^a ±0.11	10.44 ^{ab} ±4.68	14.89 ^b ±1.02	34.67 ^c ±7.21	44.29 ^d ±8.04
5	1.85 ^a ±0.10	8.67 ^{ab} ±0.67	18.00 ^b ±4.06	38.44 ^c ±2.52	53.77 ^d ±12.58
10	2.01 ^a ±0.14	16.67 ^b ±4.37	26.00 ^c ±6.43	34.00 ^c ±3.06	45.11 ^d ±7.31
20	2.16 ^a ±0.19	17.56 ^b ±3.79	18.67 ^b ±3.71	34.89 ^c ±11.74	48.00 ^c ±11.02
30	2.15 ^a ±0.22	17.78 ^b ±3.79	27.16 ^b ±4.90	53.11 ^c ±10.21	49.84 ^c ±8.96
40	2.21 ^a ±0.15	18.22 ^b ±4.91	25.11 ^b ±2.04	37.56 ^c ±6.19	40.67 ^c ±7.86
50	2.55 ^a ±0.10	13.78 ^b ±3.01	19.11 ^c ±1.68	39.11 ^d ±2.52	42.44 ^d ±3.67
60	2.61 ^a ±0.13	17.78 ^b ±5.09	20.89 ^b ±3.67	34.89 ^c ±10.42	35.78 ^c ±1.02
70	2.76 ^a ±0.25	16.89 ^b ±3.67	20.67 ^b ±4.06	32.89 ^c ±8.57	34.00 ^d ±2.67
80	3.68 ^a ±0.43	15.56 ^a ±4.44	32.22 ^b ±16.00	35.47 ^{bc} ±5.91	55.97 ^c ±7.06
90	3.92 ^a ±0.30	19.09 ^a ±11.26	19.78 ^a ±3.42	45.11 ^b ±1.02	46.89 ^b ±0.77
100	3.75 ^a ±0.11	21.33 ^a ±5.21	23.91 ^b ±3.63	46.00 ^c ±7.06	47.33 ^c ±4.37

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างระยะเวลาในการทดลอง โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตารางที่ 4.5 น้ำหนักสดและเปอร์เซ็นต์การเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระ

ระดับแคตเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การเจริญเติบโต (วัน)						
	0 (วัน)	1 (วัน)	7 (วัน)	15 (วัน)	22 (วัน)	30 (วัน)	
0	น้ำหนักสด (กรัม)	44.14	44.68	51.98	64.64	78.7	107.11
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	1.22	17.76	46.44	78.30	142.66
	การเจริญสัมพัทธ์	-	0.01	0.18	0.46	0.78	1.43
5	น้ำหนักสด (กรัม)	43.47	45.85	54.5	61.19	65	89.09
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	5.48	25.37	40.76	49.53	104.95
	การเจริญสัมพัทธ์	-	0.05	0.25	0.41	0.50	1.05
10	น้ำหนักสด (กรัม)	45.07	45.07	55.11	62.3	71.63	92.46
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	0.00	22.28	38.23	58.93	105.15
	การเจริญสัมพัทธ์	-	0.00	0.22	0.38	0.59	1.05
20	น้ำหนักสด (กรัม)	44.82	45.77	53.6	58.06	81.57	86.66
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	2.12	19.59	29.54	81.99	93.35
	การเจริญสัมพัทธ์	-	0.02	0.20	0.30	0.82	0.93
30	น้ำหนักสด (กรัม)	41.99	44.97	56.72	67.03	85.7	94.65
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	7.10	35.08	59.63	104.10	125.41
	การเจริญสัมพัทธ์	-	0.07	0.35	0.60	1.04	1.25
40	น้ำหนักสด (กรัม)	43.17	43.27	45.89	49.85	53.39	60.4
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	0.23	6.30	15.47	23.67	39.91
	การเจริญสัมพัทธ์	-	0.00	0.06	0.15	0.24	0.40
50	น้ำหนักสด (กรัม)	41.75	42.21	47.18	48.85	55.96	58.68
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	1.10	13.01	17.01	34.04	40.55
	การเจริญสัมพัทธ์	-	0.01	0.13	0.17	0.34	0.41
60	น้ำหนักสด (กรัม)	40.80	41.74	46.57	48.32	54.33	56.21
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	2.30	14.14	18.43	33.16	37.77
	การเจริญสัมพัทธ์	-	0.02	0.14	0.18	0.33	0.38
70	น้ำหนักสด (กรัม)	43.90	44.01	46.91	49.18	50.53	53.96
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	0.25	6.86	12.03	15.10	22.92
	การเจริญสัมพัทธ์	-	0.00	0.07	0.12	0.15	0.23

ตารางที่ 4.5 น้ำหนักสดและเปอร์เซ็นต์การเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระ (ต่อ)

ระดับแคะเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	การเจริญเติบโต (วัน)						
	0 (วัน)	1 (วัน)	7 (วัน)	15 (วัน)	22 (วัน)	30 (วัน)	
80	น้ำหนักสด (กรัม)	42.20	43.63	44.88	42.27	47.24	54.53
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	3.39	6.35	0.17	11.94	29.22
	การเจริญสัมพัทธ์	-	0.03	0.06	0.00	0.12	0.29
90	น้ำหนักสด (กรัม)	43.03	44.68	45.49	47.36	46.87	52.97
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	3.83	5.72	10.06	8.92	23.10
	การเจริญสัมพัทธ์	-	0.04	0.06	0.10	0.09	0.23
100	น้ำหนักสด (กรัม)	41.51	42.08	44.31	45.42	45.83	50.81
	เปอร์เซ็นต์การเติบโต	-	1.37	6.75	9.42	10.41	22.40
	การเจริญสัมพัทธ์	-	0.01	0.07	0.09	0.10	0.22

4.1.3 การแสดงความเป็นพิษของแคะเมียมต่อหญ้าเนเปียร์แคระ

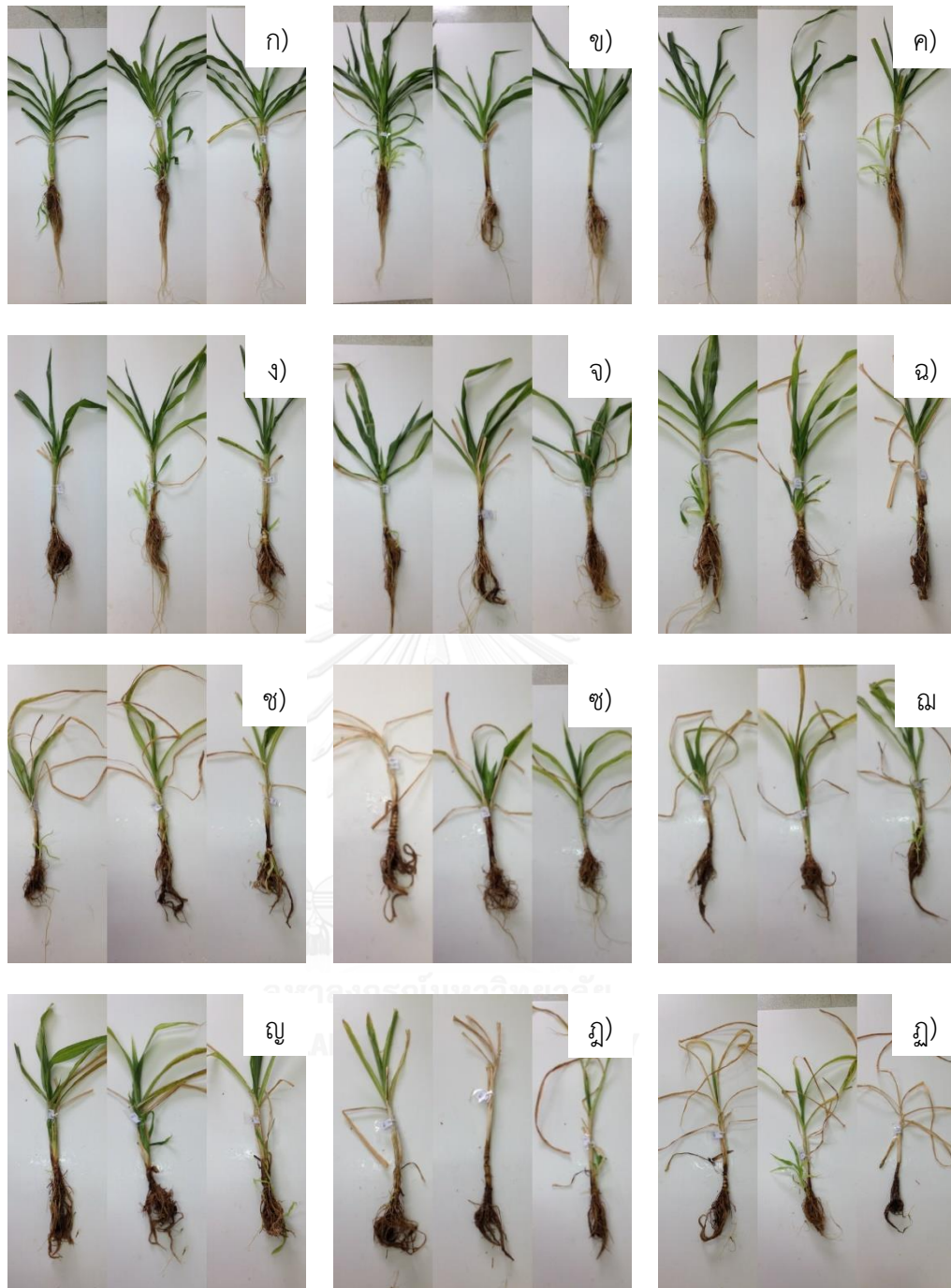
การศึกษาการแสดงความเป็นพิษของแคะเมียมต่อหญ้าเนเปียร์แคระ การทดลองครั้งนี้ได้ทำการประเมินเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษ (Phytotoxicity หรือ Plant injury) ที่ 1, 7, 15, 22 และ 30 วัน หลังจากปลูกหญ้าเนเปียร์แคระในสารละลายแคะเมียมที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) จากการศึกษาพบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีเปอร์เซ็นต์แสดงความเป็นพิษต่ำที่ระยะ 7 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 0.00, 0.83, 1.67, 2.24, 2.41, 4.91, 8.89, 13.76, 16.44, 22.22, 10.56 และ 27.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.6) โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 30 วัน พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษสูงขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 0.00, 3.40, 4.72, 3.24, 5.72, 10.00, 12.22, 14.71, 23.78, 52.22, 70.56 และ 71.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.6) นอกจากนี้ยังพบว่า หญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการเติมสารแคะเมียมที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 7, 15, 22 และ 30 วัน มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษสูงสุดมีค่าเท่ากับ 27.33, 37.22, 52.11 และ 71.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.6) โดยหญ้าเนเปียร์แคระมีอาการแสดงความเป็นพิษ ได้แก่ ลำต้นและใบมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีเหลืองหรือไหม้เกือบทั้งต้น และมีอาการเหี่ยวเฉา รวมทั้งต้นมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่น (ดังรูปที่ 4.1) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาด้านน้ำหนักสด และอัตราการเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระ ทั้งนี้การแสดงความเป็นพิษจากสารละลายแคะเมียมดังกล่าว อาจเนื่องมาจากสารละลายแคะเมียมมีผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ทำให้พืชทดลองเกิดการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืชผิดไปจากปกติ (ศิริมาศ สิทธิกรม, 2540) รวมทั้งสารละลาย

แคดเมียมอาจส่งผลกระทบต่อผลผลิตและการสังเคราะห์ด้วยแสง และกระบวนการคายน้ำของพืชด้วย นอกจากนี้ แคดเมียมยังมีผลต่อการลดปริมาณคลอโรฟิลล์ คาร์โบไดรยด์ และทำให้เกิดความผิดปกติในโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ เช่น การจัดเรียงตัวของกรานา (Grana) และลามেলা เป็นต้น (Lamella) (Baszyki, 1980 อ้างถึงในสนธิ คชวัฒน์, 2530) ผลการทดลองยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ (2014) ที่ศึกษาผลของแคดเมียมต่อการเจริญเติบโต การสังเคราะห์แสง และการสะสมโลหะของหญ้า บาน่า (*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*) พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นที่มากกว่า 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน แคดเมียมนั้นส่งผลให้พืชแสดงอาการเป็นพิษ ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ของพืชที่พบได้ในใบที่โตเต็มที่ที่มีค่าความเข้มข้นต่ำกว่าในใบอ่อน ซึ่งการสังเคราะห์แสงมีความไวต่อโลหะหนักในพืชสูง และยังคงปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืชอีกด้วย

ตารางที่ 4.6 การแสดงความเป็นพิษของแคดเมียมต่อหญ้าเนเปียร์แคระ (Phytotoxicity) ในน้ำเสียสังเคราะห์

ระดับแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษจากแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระ (%)			
	7 (วัน)	15 (วัน)	22 (วัน)	30 (วัน)
0	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
5	0.83 ^a ±1.44	1.50 ^a ±1.32	1.50 ^a ±1.32	3.40 ^{ab} ±2.02
10	1.67 ^a ±1.44	1.67 ^a ±1.44	2.78 ^a ±0.48	4.72 ^{ab} ±2.10
20	2.24 ^{ab} ±0.25	2.50 ^a ±2.50	3.24 ^a ±1.53	3.24 ^{ab} ±1.53
30	2.41 ^{ab} ±2.51	2.98 ^{ab} ±1.29	2.98 ^{ab} ±1.29	5.72 ^{bc} ±2.87
40	4.91 ^{ab} ±4.41	7.31 ^{ab} ±2.78	7.31 ^{ab} ±2.78	10.00 ^{bc} ±3.33
50	8.89 ^{bc} ±6.94	10.00 ^{bc} ±5.77	10.00 ^b ±5.77	12.22 ^{cd} ±6.94
60	13.76 ^{de} ±1.57	13.76 ^{cd} ±1.57	13.76 ^b ±1.57	14.71 ^d ±2.58
70	16.44 ^{ef} ±3.36	17.56 ^d ±6.05	23.56 ^c ±3.36	23.78 ^e ±4.02
80	22.22 ^{fg} ±4.81	22.78 ^e ±6.31	51.11 ^d ±8.39	52.22 ^f ±6.94
90	10.56 ^d ±4.19	27.22 ^e ±7.52	57.22 ^d ±11.10	70.56 ^g ±8.22
100	27.33 ^g ±6.43	37.22 ^f ±2.55	52.11 ^d ±9.83	71.78 ^g ±1.68

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)

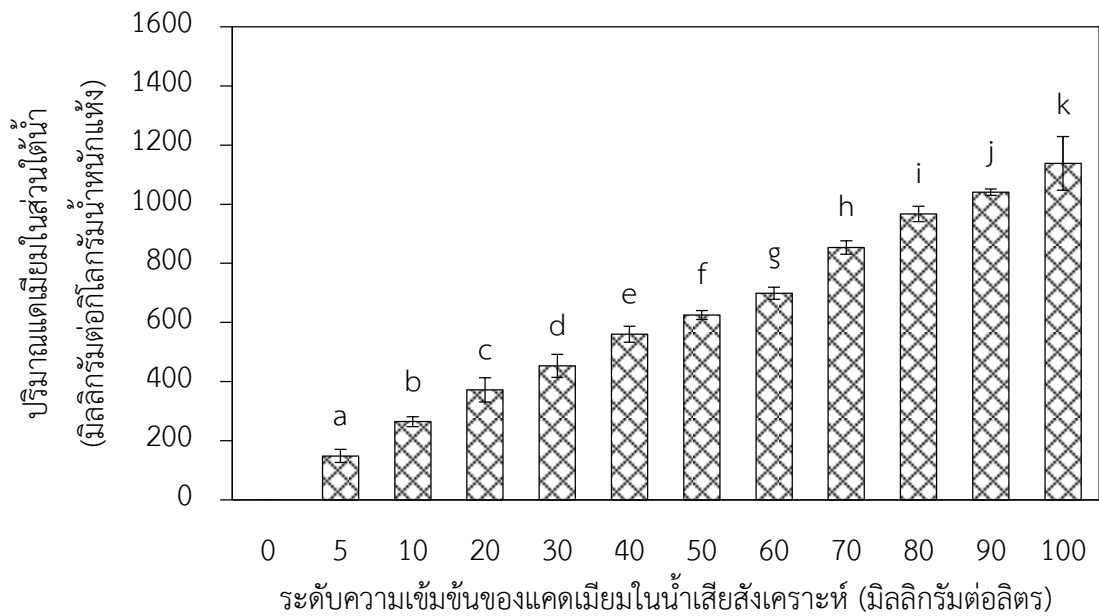


รูปที่ 4.1 การแสดงความเป็นพิษของแคดเมียมต่อหญ้าเนเปียร์แคระ ก) 0 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ข) 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ค) 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ง) 20 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) จ) 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ฉ) 40 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ช) 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ช) 60 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ฉ) 70 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ฉ) 80 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ฉ) 90 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) และ ฉ) 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm)

4.1.4 การสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ

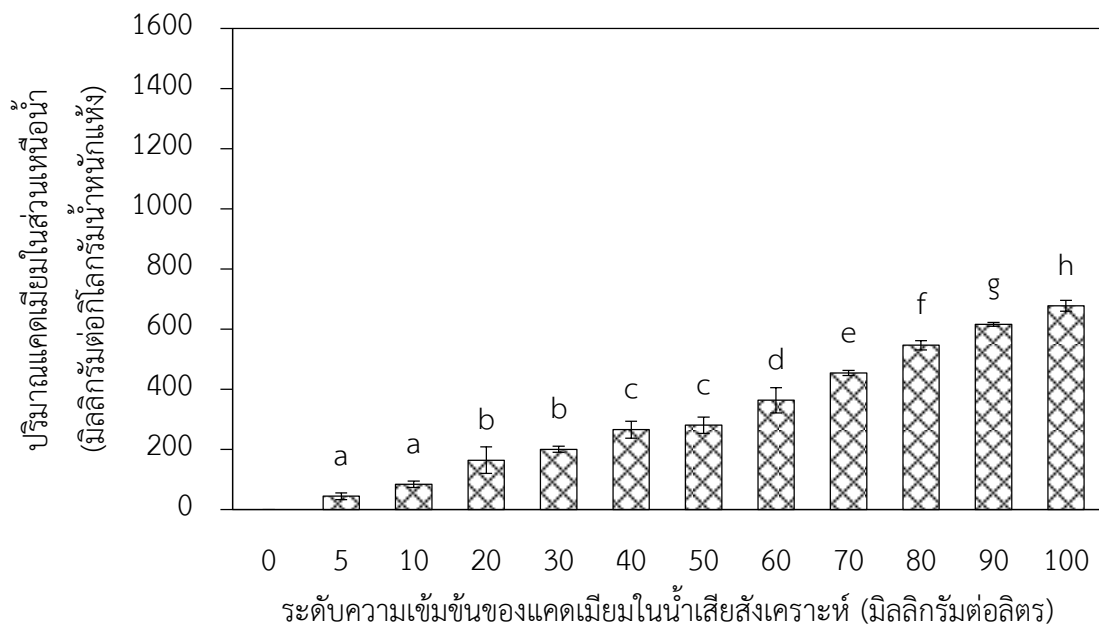
1) ปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)

ผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ที่ระยะเวลา 30 วัน พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีความสามารถในการสะสมแคดเมียมไว้ในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 148.33, 264.67, 371.71, 453.37, 560.53, 625.33, 698.83, 853.73, 967.00, 1,040.80 และ 1,137.83 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.2) โดยค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ส่วนปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) เท่ากับ 43.87, 83.97, 163.67, 200.00, 265.34, 280.17, 363.07, 453.97, 546.15, 615.96 และ 677.59 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.3) โดยระดับความเข้มข้นที่ 5-10, 20-30 และ 40-50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ สำหรับความเข้มข้นที่ 60-100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ทั้งนี้เมื่อนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งต้นของพืชทดลอง พบว่า มีค่าเท่ากับ 96.10, 174.32, 267.69, 326.69, 412.94, 452.75, 530.95, 653.85, 756.57, 828.38 และ 907.71 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ดังรูปที่ 4.4) โดยทุกระดับความเข้มข้นที่ทำการศึกษาค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ยกเว้นที่ระดับความเข้มข้น 40-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าการสะสมของแคดเมียมทั้งหมดในหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการสะสมแคดเมียมมากที่สุด รองลงมาคือ ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ทั้งนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระระหว่างส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำมีค่ามากกว่าส่วนเหนือน้ำอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wójcik และคณะ (2005) ที่ทำการศึกษายปริมาณการสะสมของแคดเมียมด้วยต้น *Thlaspi caerulescens* ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นแคดเมียมเท่ากับ 500 ไมโครโมลาร์ ที่ระยะเวลา 14 วัน ผลการศึกษาพบว่า ต้น *Thlaspi caerulescens* มีการสะสมแคดเมียมในส่วนที่เป็นรากมากกว่าส่วนของลำต้น



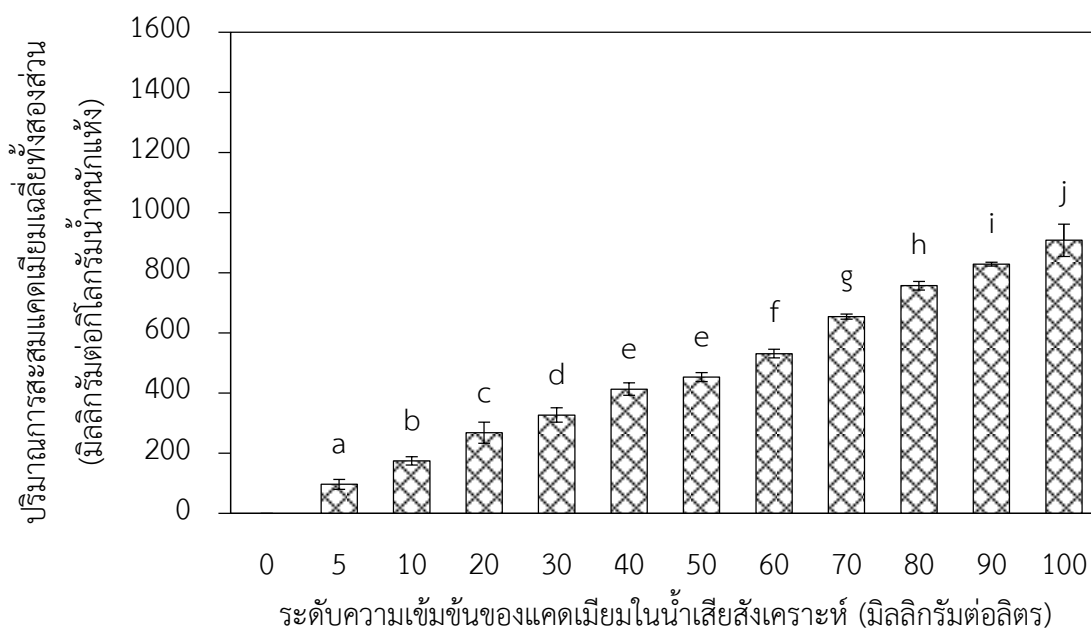
รูปที่ 4. 2 ปริมาณแคดเมียมในส่วนได้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)



รูปที่ 4.3 ปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)



รูปที่ 4.4 ปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งต้นหญ้าเนเปียร์แคระ (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการสะสมของแคดเมียมทั้งหมดในหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ ยังพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการสะสมแคดเมียมมากที่สุด แสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเพิ่มขึ้น ปริมาณการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กัลปพฤกษ์ คงเมือง (2553) ที่ทำการศึกษาศรีษัทธิภาพของผักตบชวาในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเพิ่มขึ้น ปริมาณการสะสมแคดเมียมในผักตบชวามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้เป็นที่น่าสังเกตได้ว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมตั้งแต่ 40-100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) มีความเป็นพิษต่อพืชทดลองจนแสดงอาการผิดปกติ เช่น ใบพืชมีการเปลี่ยนสีจากสีเขียวปกติเป็นสีเหลือง น้ำตาล หรือแห้งทั้งใบพืชเกิดอาการแคระแกรนและตาย หรือไม่สามารถเจริญเติบโตได้ และเมื่อพิจารณาถึงความสามารถของหญ้าเนเปียร์แคระที่สามารถอยู่รอดได้ตลอดการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติมสารเคิลเตพบว่า ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) มีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะนำไปใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป หรือกล่าวได้ว่าระดับแคดเมียมและสารเคิลเตส่งผลต่อการเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด และมีอาการแสดงความเป็นพิษน้อยที่สุด ดังนั้นจึงเลือกระดับแคดเมียมดังกล่าวไปทำการทดลองขั้นตอนต่อไป

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคะระหว่างส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีค่ามากกว่าส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) อย่างเห็นได้ชัด (ดังตารางที่ 4.7) แสดงให้เห็นได้ว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะมีมากกว่าส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) สอดคล้องกับการศึกษาของ Chayapan และคณะ (2015) ที่ทำการศึกษาศักยภาพในการบำบัดแคดเมียมและสังกะสีด้วยการใช้พืช (Phytoremediation) โดยปลูกแบบไม่ใช้ดิน (Hydroponics) ได้แก่ เผือก (*Colocasia esculenta* L. Schott.) หญ้าสามเหลี่ยม (*Cyperus malaccensis* Lam.) และธูปฤาษี (*Typha angustifolia* L.) ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 0, 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) และที่ระดับความเข้มข้นของสังกะสีเท่ากับ 0, 10, 20, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) โดยมีการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 15 วัน ผลการศึกษาพบว่า พืชทั้ง 3 ชนิด มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักทั้งแคดเมียมและสังกะสีในส่วนใต้น้ำ (ราก) มากกว่าส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)

2) ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพ (Bioconcentration factor; BCF) ของหญ้าเนเปียร์แคะ (*Pennisetum purpureum* cv. Mott)

การศึกษาค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคะ (Bioconcentration factor; BCF) ที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติมสารละลายแคดเมียมในน้ำที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 30 วัน พบว่า ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคะ (BCF) ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) มีค่าเท่ากับ 14.58, 19.23, 14.30, 18.11, 17.85, 16.65, 16.44, 15.87, 15.76, 15.59 และ 12.22 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.8) สำหรับค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคะ (BCF) ในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีค่าเท่ากับ 49.39, 60.60, 32.48, 41.06, 37.83, 37.33, 31.51, 29.84, 27.94, 26.32 และ 20.53 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.8) สำหรับศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคะ (BCF) มีค่าเฉลี่ยรวมกันทั้งสองส่วนเท่ากับ 31.94, 39.92, 23.39, 29.58, 27.84, 26.99, 23.98, 22.86, 21.85, 20.95 และ 16.38 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.8) โดยในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) รวมกันของหญ้าเนเปียร์แคะมีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมน้อยที่สุด คือ 16.38 ที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลา 30 วัน และเมื่อทำการพิจารณาจากแนวโน้ม พบว่า ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคะ (BCF) ทั้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้น

มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Rungruang และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาการสะสมแคดเมียมของพืช 4 ชนิด คือ หญ้ากีนี่ (*Panicum maximum*) ต้นดาวกระจาย (*Cosmos sulphureus*) ต้นดาวเรือง (*Tagetes erecta* L.) และต้นทานตะวัน (*Helianthus annuus*) ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 50, 100, 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า การเจริญเติบโตของพืชทั้ง 4 ชนิด มีการเจริญเติบโตลดลงเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น และทำให้ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียม

ตารางที่ 4.7 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ

ความเข้มข้นของแคดเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง)		
	ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ)	ส่วนใต้น้ำ (ราก)	เฉลี่ยทั้งสองส่วน
0	nd	nd	-
5	43.87 ^a ±11.61	148.33 ^a ±22.28	96.10 ^a ±16.76
10	83.97 ^a ±10.44	264.67 ^b ±17.01	174.32 ^b ±13.72
20	163.67 ^b ±44.30	371.71 ^c ±41.15	267.69 ^c ±34.78
30	200.00 ^b ±9.99	453.37 ^d ±38.77	326.69 ^d ±23.87
40	265.34 ^c ±28.36	560.53 ^e ±26.89	412.94 ^e ±20.85
50	280.17 ^c ±27.20	625.33 ^f ±15.63	452.75 ^e ±15.19
60	363.07 ^d ±42.16	698.83 ^g ±20.93	530.95 ^f ±14.63
70	453.97 ^e ±8.62	853.73 ^h ±22.87	653.85 ^g ±8.31
80	546.15 ^f ±15.58	967.00 ⁱ ±25.63	756.57 ^h ±14.08
90	615.96 ^g ±6.25	1,040.80 ^j ±10.85	828.38 ⁱ ±6.26
100	677.59 ^h ±18.15	1,137.83 ^k ±90.82	907.71 ^j ±54.03

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT), nd หมายถึง ไม่พบ (ปริมาณต่ำสุดที่สามารถวัดค่าได้ เท่ากับ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ 4.8 ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระ (Bioconcentration factor; BCF)

ความเข้มข้นของแคดเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระ (Bioconcentration factor; BCF)		
	ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ)	ส่วนใต้น้ำ (ราก)	เฉลี่ยทั้งสองส่วน
5	14.58 ^{ab} ±3.77	49.30 ^f ±7.06	31.94 ^s ±5.35
10	19.23 ^c ±2.34	60.60 ^s ±3.75	39.92 ^h ±3.05
20	14.30 ^{ab} ±3.89	32.48 ^{bcd} ±3.63	23.39 ^{bcd} ±3.07
30	18.11 ^{bc} ±0.93	41.06 ^e ±3.56	29.58 ^{fg} ±2.20
40	17.85 ^{bc} ±1.55	37.83 ^{de} ±3.72	27.84 ^{def} ±2.20
50	16.65 ^{bc} ±0.55	37.33 ^{bcd} ±2.70	26.99 ^{cde} ±1.09
60	16.44 ^{bc} ±2.59	31.51 ^{bc} ±0.69	23.98 ^{bcd} ±1.61
70	15.87 ^{abc} ±0.45	29.84 ^b ±0.45	22.86 ^{bc} ±0.03
80	15.76 ^{abc} ±0.48	27.94 ^b ±1.60	21.85 ^b ±0.99
90	15.59 ^{abc} ±1.45	26.32 ^b ±2.22	20.95 ^b ±1.83
100	12.22 ^a ±0.34	20.53 ^a ±1.63	16.38 ^a ±0.97

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan' s new multiple range test (DMRT)

3) เปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระ

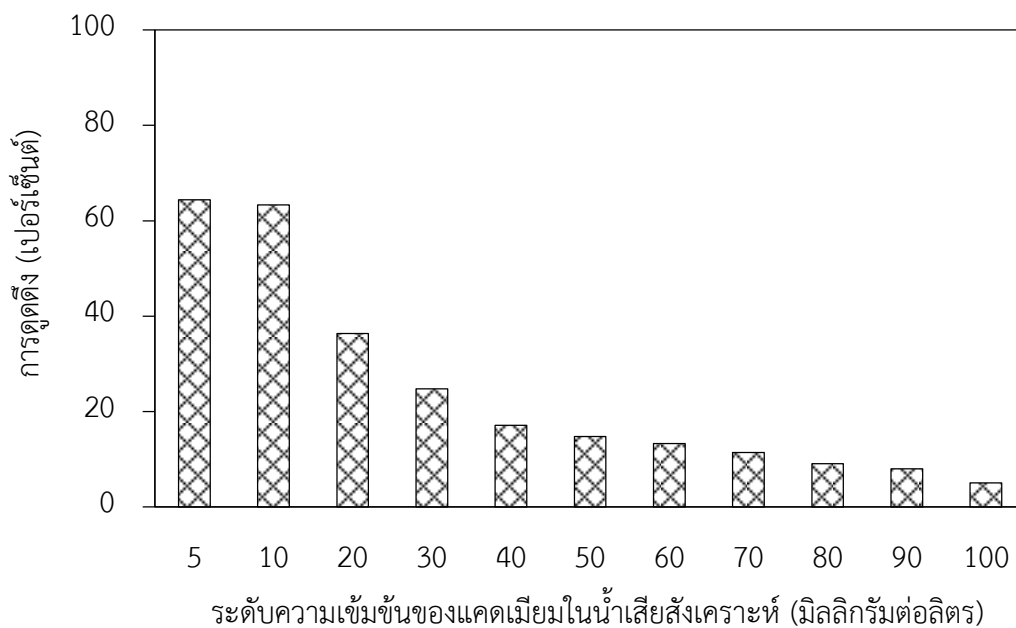
การดูดซับแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เติมสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่หญ้าเนเปียร์แคระสามารถดูดซับได้ในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีค่าเท่ากับ 2.16, 3.77, 3.95, 3.97, 3.77, 4.31, 3.87, 4.06, 3.66, 3.55 และ 3.14 มิลลิกรัม ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.9) และปริมาณแคดเมียมที่หญ้าเนเปียร์แคระสามารถดูดซับได้ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) เท่ากับ 1.70, 3.83, 4.79, 4.94, 4.45, 4.54, 5.73, 5.55, 5.05, 5.09 และ 2.94 มิลลิกรัม ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.9) และปริมาณแคดเมียมที่หญ้าเนเปียร์แคระสามารถดูดซับได้รวมทั้งสองส่วน เท่ากับ 3.86, 7.60, 8.73, 8.91, 8.22, 8.86, 9.60, 9.62, 8.72, 8.64 และ 6.08 มิลลิกรัม

ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.9) ทั้งนี้เมื่อคิดเป็นส่วนของเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์คิดเป็น 64.36, 63.33, 36.40, 24.74, 17.13, 14.76, 13.33, 11.45, 9.08, 8.00 และ 5.07 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับของระดับความเข้มข้นแคดเมียมที่ศึกษา (ดังตารางที่ 4.9) โดยที่เปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์มากที่สุดอยู่ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงเมื่อระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (ดังรูปที่ 4.5) โดยที่เปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์น้อยที่สุดอยู่ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดังรูปที่ 4.5) ทั้งนี้เนื่องจากระดับความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลทำให้หญ้าเนเปียร์แคระแสดงอาการความเป็นพิษ และทำให้หญ้าเนเปียร์แคระมีการดูดซับแคดเมียมได้ลดลง ผลดังกล่าวจึงมีความสอดคล้องกับการศึกษาค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพ (Bioconcentration factor; BCF) ของหญ้าเนเปียร์แคระ

ตารางที่ 4.9 ปริมาณแคดเมียมที่หญ้าเนเปียร์แคระสามารถดูดซับได้ทั้งหมด

ความเข้มข้นของแคดเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคดเมียมที่พืชดูดซับได้ (มิลลิกรัม)			เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (%)
	ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)	ส่วนใต้น้ำ (ราก)	รวมทั้ง สองส่วน	
5	1.70	2.16	3.86	64.36
10	3.83	3.77	7.60	63.33
20	4.79	3.95	8.73	36.40
30	4.94	3.97	8.91	24.74
40	4.45	3.77	8.22	17.13
50	4.54	4.31	8.86	14.76
60	5.73	3.87	9.60	13.33
70	5.55	4.06	9.62	11.45
80	5.05	3.66	8.72	9.08
90	5.09	3.55	8.64	8.00
100	2.94	3.14	6.08	5.07

หมายเหตุ: คำนวณจากค่าเฉลี่ยของปริมาณแคดเมียม และน้ำหนักแห้งของหญ้าเนเปียร์แคระ



รูปที่ 4.5 เปอร์เซนต์การดูดซับแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระ

4.1.5 ความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม

การศึกษาการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ เมื่อทำการพิจารณาปริมาณการสะสมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) มีค่าเท่ากับ 200.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง และในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีค่าเท่ากับ 453.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.7) และเมื่อทำการพิจารณาถึงค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพ (Bioconcentration factor; BCF) ของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เดิมสารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) พบว่า ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพ (BCF) ในหญ้าเนเปียร์แคระมีค่าที่ลดลงในระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) เท่ากับ 27.84, 26.99, 23.98, 22.86, 21.85, 20.95 และ 16.38 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.8) ซึ่งสอดคล้องกับผลการเจริญเติบโตที่มีการวิเคราะห์เปอร์เซนต์การเจริญเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระพบว่า หญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่มีปริมาณแคดเมียมเข้มข้นสูงขึ้นจะมีการชะงักการเจริญเติบโตของพืชรวมถึงแสดงความเป็นพิษเพิ่มขึ้น โดยมีเปอร์เซนต์การเจริญเติบโตลดลงมีค่าเท่ากับ 39.91, 40.55, 37.77, 22.92, 29.22, 23.10 และ 22.40 ตามลำดับของระดับความเข้มข้นแคดเมียมตั้งแต่ 40-100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดังตารางที่ 4.5) และมีเปอร์เซนต์การแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ (Phytotoxicity) จากระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่มากขึ้นมีค่าเท่ากับ

10.00, 12.22, 14.71, 23.78, 52.22, 70.56 และ 71.78 ตามลำดับของความเข้มข้นแคดเมียมที่ 40-100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดังตารางที่ 4.6) ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่อาจเป็นปัจจัยที่ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระมีค่าลดลงเท่ากับ 17.13, 14.76, 13.33, 11.45, 9.08, 8.00 และ 5.07 ตามลำดับ ของความเข้มข้นแคดเมียมที่ 40-100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดังตารางที่ 4.9) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Das และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาดังกล่าวในการบำบัดแคดเมียมด้วยวิธีการฟื้นฟูโดยพืช ซึ่งพืชที่ใช้ในการศึกษา คือ ต้นจอก (*Pistia stratiotes* L.) โดยใช้ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างทั้งสิ้น 21 วัน พบว่า ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพ (BCF) มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเพิ่มขึ้นทำให้การเจริญเติบโตของต้นจอกนั้นลดลง และยังส่งผลต่ออาการแสดงความเป็นพิษของต้นจอกโดยใบต้นจอกเหี่ยว และมีสีเหลืองไหม้

ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้เพื่อทำการศึกษาทดลองในขั้นตอนต่อไป จึงได้พิจารณาถึงความสามารถในการอยู่รอดของหญ้าเนเปียร์แคระตลอดระยะเวลาของการทดลองในขั้นตอนต่อไปที่ต้องมีการเติมสารเคมีคัลในน้ำเสียสังเคราะห์ จึงเลือกใช้สารละลายแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ทั้งนี้เนื่องจากที่ระดับความเข้มข้นดังกล่าวหญ้าเนเปียร์แคระสามารถเจริญเติบโตได้ดี (ดังตารางที่ 4.5) และมีการแสดงความเป็นพิษจากแคดเมียมในระดับที่ต่ำ หรือสามารถกล่าวได้ว่า เปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษจากแคดเมียมที่มีต่อหญ้าเนเปียร์แคระมีค่าเท่ากับ 5.72 % (ดังตารางที่ 4.6)

4.2 ผลการศึกษาสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ต่อการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

การศึกษาผลของสาร EDTA และสาร NTA ต่อการดูดซับแคดเมียมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดลอง คือ 1.2 ลิตรต่อภาชนะ โดยทำการวัดคุณภาพน้ำ เก็บข้อมูลการเจริญเติบโต รวมทั้งเก็บตัวอย่างพืช และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทุก 15 วัน รวมใช้ระยะเวลาในการศึกษา 105 วัน ตลอดระยะเวลาของการทดลอง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของน้ำเสียสังเคราะห์

1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of hydrogen ion: pH)

การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งตลอดระยะเวลาของการทดลองไม่ได้มีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างในทุกชุดการทดลอง เมื่อทำการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างก่อนการทดลอง พบว่า ค่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) และเมื่อทำการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างหลังจากปลูกหญ้าเนเปียร์แคระแล้ว พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในแต่ละชุดการทดลองเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 105 วัน โดยชุดการทดลองที่มีการเติมสารซีเลตในอัตราส่วน 1:0.5 และ 1:1 โมล สามารถแสดงผลได้ดังนี้ 1) ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอ (EDTA) มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.11 และ 6.88 ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมล 2) ชุดการทดลองที่เติมเอนทีเอ (NTA) มีค่าความเป็นกรด-ด่างเมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 6.80 และ 6.76 ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมล และ 3) ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับเอนทีเอ (EDTA+NTA) มีค่าความเป็นกรด-ด่างเมื่อสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ เท่ากับ 6.82 และ 6.79 ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมล ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นได้ว่า ในแต่ละชุดการทดลองค่าความเป็นกรด-ด่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น (ดังตารางที่ 4.10) อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการดูแลรักษาหญ้าเนเปียร์แคระได้มีการเติมอากาศลงไปใต้น้ำเสียสังเคราะห์ตลอดระยะเวลาการทดลอง ซึ่งอาจทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ และส่งผลให้เกิดสมดุลของคาร์บอนेटที่มีอยู่ในน้ำเปลี่ยนไป จึงทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น (สุธินี วตศิรศักดิ์, 2550)

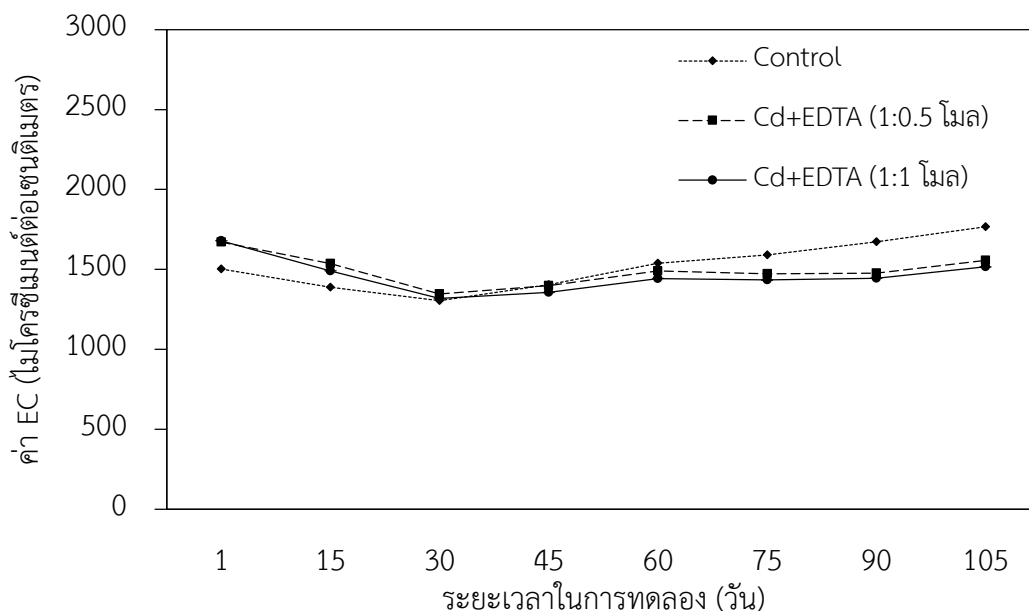
ตารางที่ 4.10 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of hydrogen ion: pH) ในน้ำเสียสังเคราะห์

ระยะเวลาในการเก็บ ตัวอย่างพืช (วัน)	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of hydrogen ion: pH)			
	Control	EDTA	NTA	EDTA+NTA
ที่อัตราส่วน 1:0.5 โมล				
1	6.49±0.03	6.42±0.05	6.50±0.02	6.44±0.05
15	6.46±0.02	6.34±0.04	6.46±0.01	6.46±0.04
30	6.42±0.02	6.33±0.02	6.43±0.02	6.42±0.06
45	6.45±0.03	6.53±0.04	6.28±0.04	6.67±0.07
60	6.58±0.06	5.72±0.04	6.61±0.03	6.71±0.04
75	6.34±0.05	6.54±0.03	6.53±0.04	6.74±0.03
90	6.61±0.04	6.52±0.03	6.55±0.04	6.48±0.05
105	6.58±0.04	7.11±0.03	6.80±0.05	6.82±0.05
ที่อัตราส่วน 1:1 โมล				
1	6.49±0.03	6.31±0.03	6.63±0.02	6.57±0.05
15	6.46±0.02	6.24±0.03	6.52±0.02	6.45±0.02
30	6.42±0.02	6.36±0.03	6.52±0.05	6.34±0.02
45	6.45±0.03	6.50±0.02	6.35±0.04	6.63±0.06
60	6.58±0.06	6.57±0.05	6.76±0.06	6.65±0.03
75	6.34±0.05	6.89±0.03	6.71±0.07	6.77±0.04
90	6.61±0.04	6.72±0.04	6.79±0.05	6.61±0.04
105	6.58±0.04	6.88±0.03	6.76±0.06	6.79±0.05

2) ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC)

การศึกษาค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งได้ทำการตรวจวัดเป็นระยะเวลา ทุก ๆ 15 วัน ภายหลังจากการปลูกหญ้าเนเปียร์แคระแล้วผลการตรวจวัด พบว่า ในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารซีเมนต์มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1,304.67-1,767.00 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,502.33, 1,388.33, 1,304.67, 1,405.00, 1,539.67, 1,591.67, 1,673.00 และ 1,767.00 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง (รูปที่ 4.6) ซึ่งในช่วงการทดลอง 30 วัน ค่าการนำไฟฟ้าในชุดควบคุมมีแนวโน้มลดลง หลังจากนั้นก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตาม

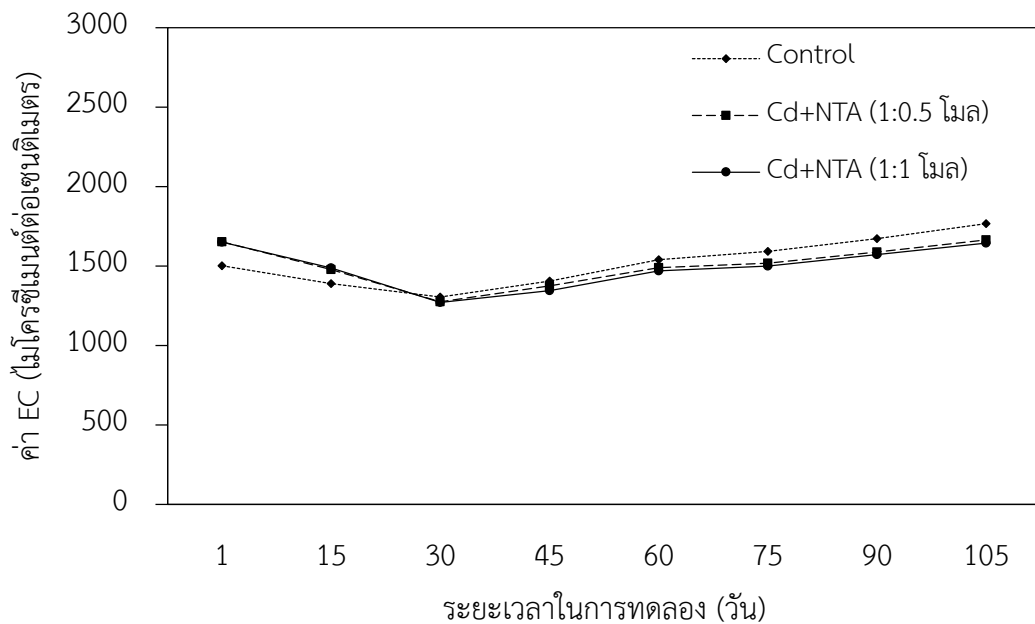
ระยะเวลาในการทดลอง โดยในชุดควบคุมที่ระยะเวลา 1 และ 15 วันมีค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่าในชุดการทดลองที่เติมสารคีเลต ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมสารคีเลตลงไปในช่วงการทดลองเป็นการเพิ่มปริมาณประจุ (Electrolyte) ในน้ำเสียสังเคราะห์ (กัลปพฤกษ์ คงเมือง, 2553)



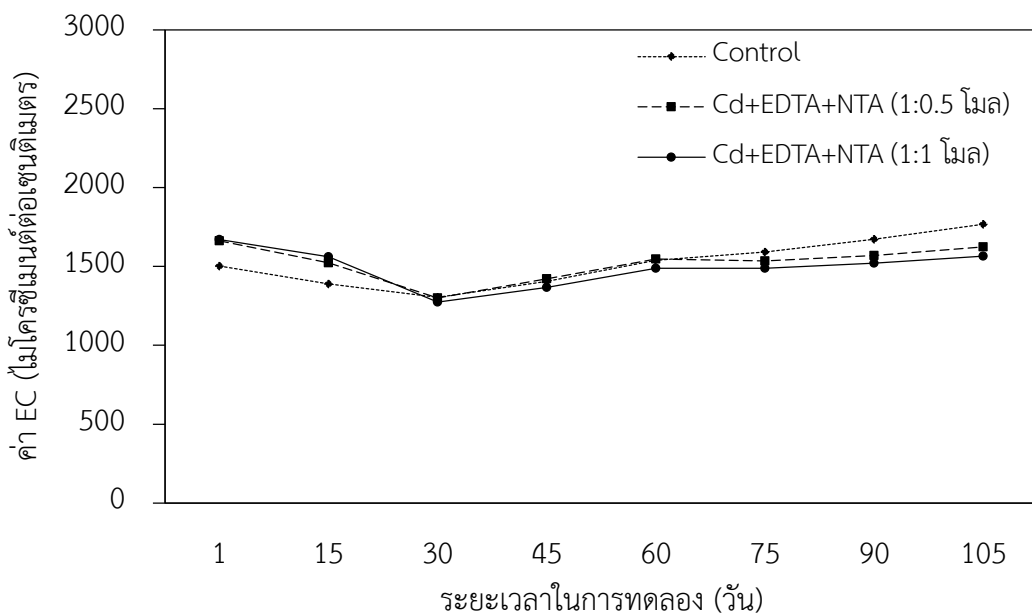
รูปที่ 4.6 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม EDTA (n=3)

ในส่วนของชุดการทดลองที่เติมสารคีเลต พบว่า ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอ (EDTA) ที่อัตราส่วน 1:0.5 และ 1:1 โมล มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1,347.67-1,671.33 และ 1,318.67-1,679.67 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมล (รูปที่ 4.6) สำหรับชุดการทดลองที่เติมแอนทีเอ (NTA) มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1,274.33-1,663.67 และ 1,269.67-1,649.00 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมล (รูปที่ 4.7) และชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอ ร่วมกับแอนทีเอ (EDTA+NTA) มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1,300.33-1,661.67 และ 1,273.00-1,670.33 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมล (รูปที่ 4.8) นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระยะเวลา 30 วัน ในทุกชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตมีค่าการนำไฟฟ้าลดลง เนื่องจากจากหญ้าเนเปียร์แคะได้มีการดูดดึงสารละลายแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ไปสะสมไว้จึงทำให้ในน้ำมีประจุลดลง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 105 วัน พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าในทุกชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตมีค่าน้อยกว่าในชุดควบคุม โดยเฉพาะในชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอ (EDTA) มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 1,556.33 และ 1,516.67 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมล และเมื่อพิจารณาจากปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอ (EDTA) นั้น พบว่า มีปริมาณแคดเมียมคงเหลือน้อยกว่าในชุดการทดลองที่เติมแอนทีเอ (NTA) และชุดการทดลอง

ที่เติมอิตีที่เอร่วมกับสารเอนทีเอ (EDTA+NTA) ทั้งนี้เนื่องจากหญ้าเนเปียร์แคระมีความสามารถในการดูดดึงแคดเมียมไปสะสมไว้ในพืชได้มากกว่าชุดการทดลองอื่น ทำให้ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) น้อยกว่า จึงส่งผลทำให้ในชุดการทดลองที่เติมสารอิตีที่เอมีค่าการนำไฟฟ้าน้อยกว่าชุดการทดลองอื่น



รูปที่ 4.7 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม NTA (n=3)

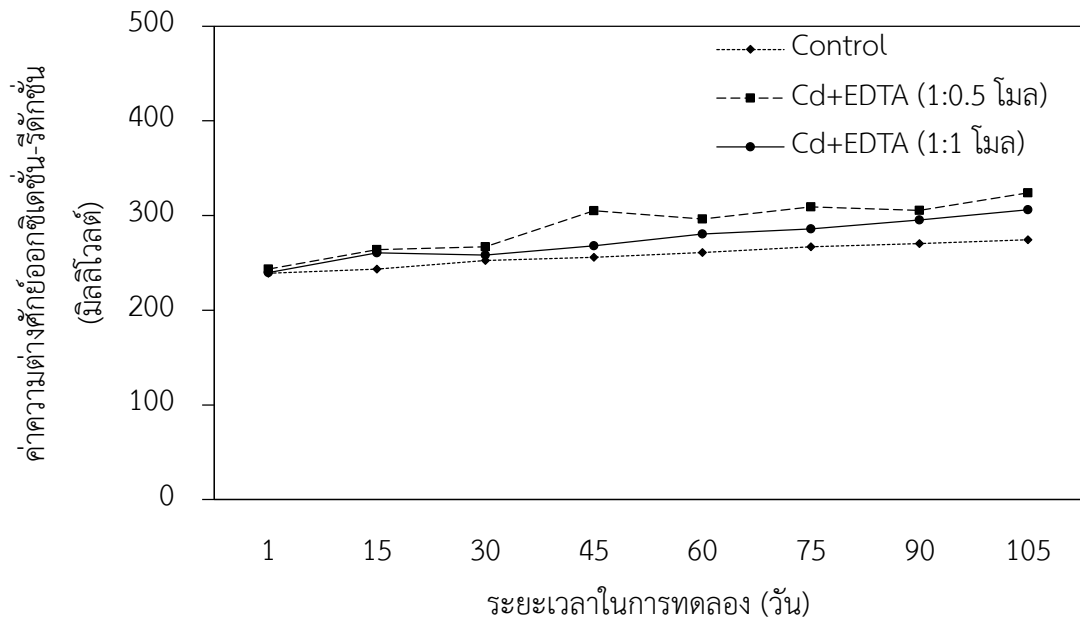


รูปที่ 4.8 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม EDTA ร่วมกับ NTA (n=3)

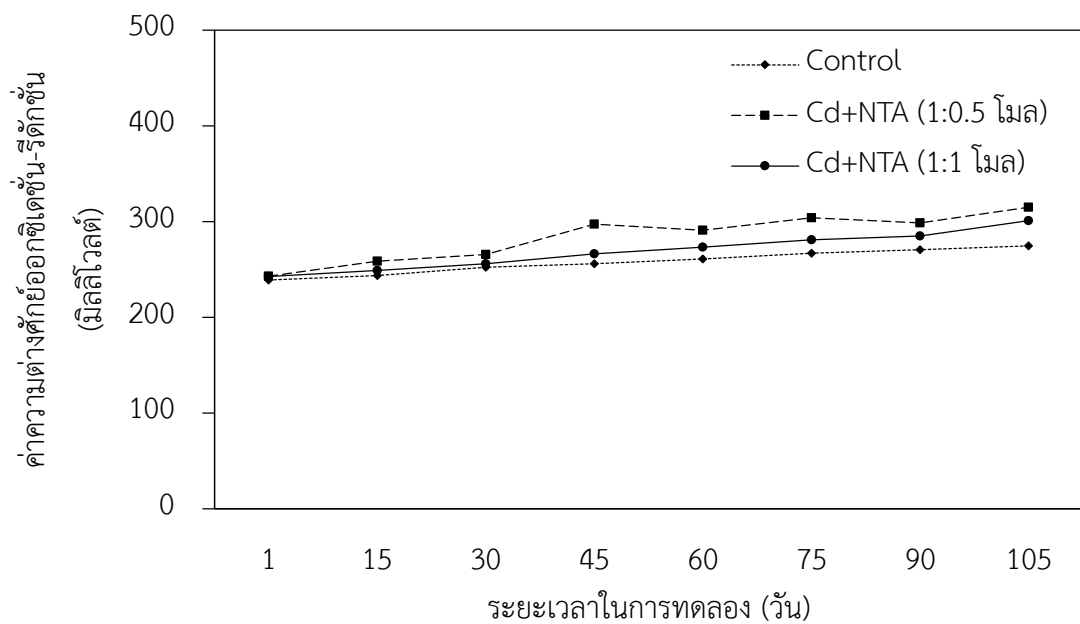
3) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation reduction potential: ORP)

การศึกษาค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำเสียสังเคราะห์ ทุกระยะเวลาของการทดลองตั้งแต่ 1-105 วัน พบว่า ในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารซีเลตมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน อยู่ในช่วง 239.10-274.53 มิลลิโวลต์ หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 239.10, 243.50, 252.43, 256.03, 260.93, 267.07, 270.53 และ 274.53 มิลลิโวลต์ ตามลำดับระยะเวลาในการทดลอง (ดังรูปที่ 4.9) ซึ่งตลอดระยะเวลาการทดลอง พบว่า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

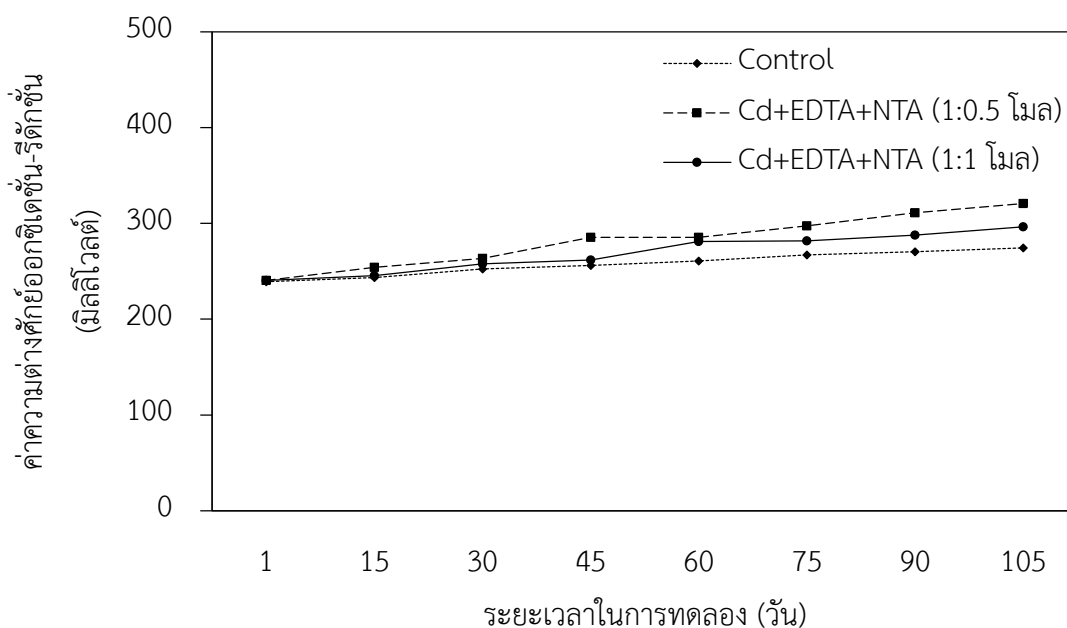
สำหรับในชุดการทดลองที่เติมสารซีเลต พบว่า ชุดการทดลองที่อีดีทีเอ (EDTA) ที่อัตราส่วน 1:0.5 และ 1:1 โมล มีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันมากที่สุด เท่ากับ 264.03 และ 260.50 มิลลิโวลต์ ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมลที่ 15 วัน และมีค่าเท่ากับ 323.83 และ 306.23 มิลลิโวลต์ ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมลที่ 105 วัน (ดังรูปที่ 4.9) สำหรับชุดการทดลองที่เติมเอนทีเอ (NTA) มีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน เท่ากับ 258.77 และ 248.33 มิลลิโวลต์ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมลที่ 15 วัน และมีค่าเท่ากับ 315.03 และ 300.97 มิลลิโวลต์ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมลที่ 105 วัน (ดังรูปที่ 4.10) ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับเอนทีเอ มีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน เท่ากับ 254.07 และ 245.63 มิลลิโวลต์ ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมลที่ 15 วัน และมีค่าเท่ากับ 320.63 และ 296.37 มิลลิโวลต์ ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมลที่ 105 วัน (ดังรูปที่ 4.11) ผลการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า ในชุดการทดลองที่เติมสารซีเลตมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันมากกว่าในชุดควบคุม เนื่องจากแคดเมียมสามารถละลายได้มากในชุดการทดลองที่เติมสารซีเลต เพราะสามารถทำให้แคดเมียมอยู่ในรูปสารละลายได้นาน ซึ่งส่งผลทำให้น้ำเสียสังเคราะห์รั่วอิเล็กตรอนจากสารละลายแคดเมียมได้มากกว่าในชุดควบคุมที่ไม่ได้ทำการเติมสารซีเลต (กัลย์สุตา ปันพา, 2557) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กัลปพฤกษ์ คงเมือง (2553) ที่ได้ทำการศึกษาค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่มีการเติมสารซีเลต ผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะเวลา 15 และ 90 วัน ในชุดการทดลองที่เติมซีตริก (CA) และชุดการทดลองที่เติมซีตริกร่วมกับอีดีทีเอ (CA+EDTA) ที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ซึ่งชุดการทดลองที่เติมซีตริก (CA) มีค่าเท่ากับ 225.2 มิลลิโวลต์ และ 283.7 มิลลิโวลต์ตามลำดับระยะเวลาการทดลอง และชุดการทดลองที่เติมซีตริกร่วมกับอีดีทีเอ (CA+EDTA) มีค่าเท่ากับ 224.5 มิลลิโวลต์ และ 257.8 มิลลิโวลต์ ตามลำดับระยะเวลาการทดลอง



รูปที่ 4.9 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม EDTA (n=3)



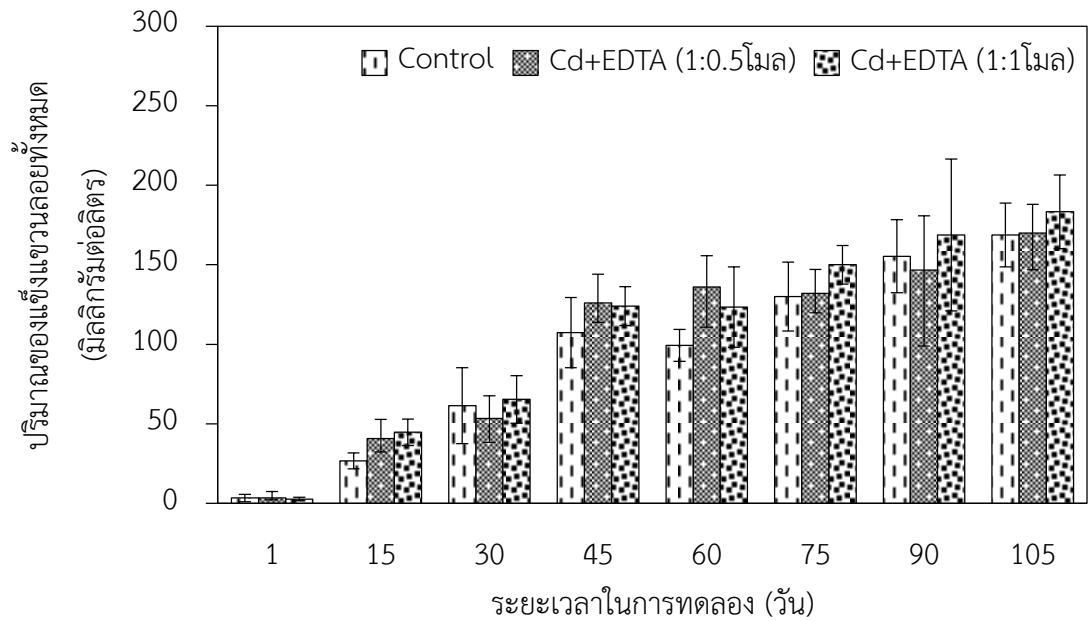
รูปที่ 4.10 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม NTA (n=3)



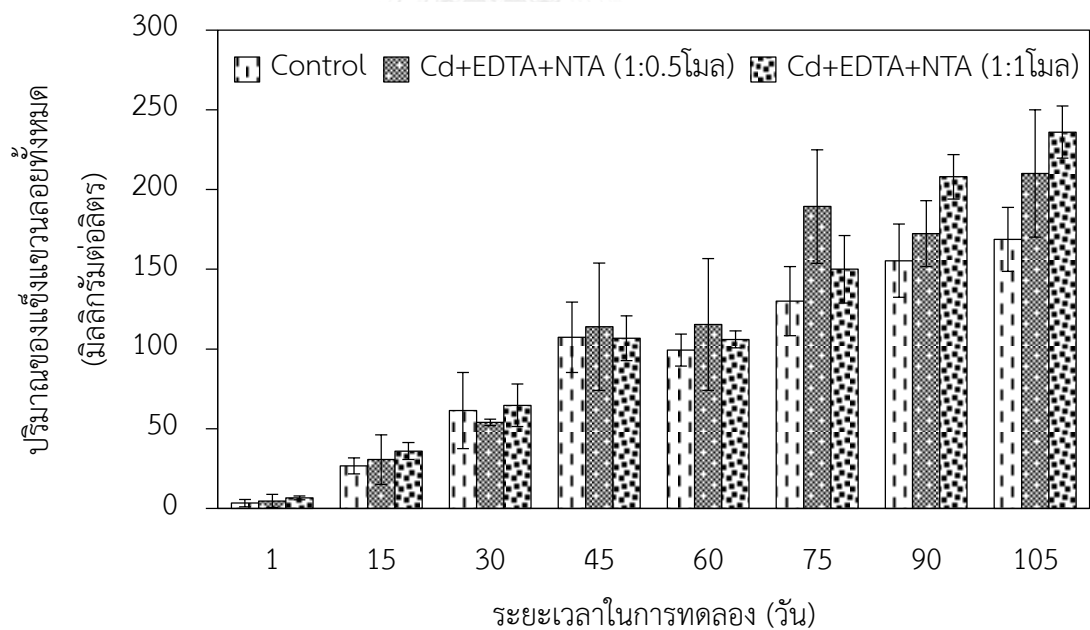
รูปที่ 4.11 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม EDTA ร่วมกับ NTA (n=3)

4) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid; TSS)

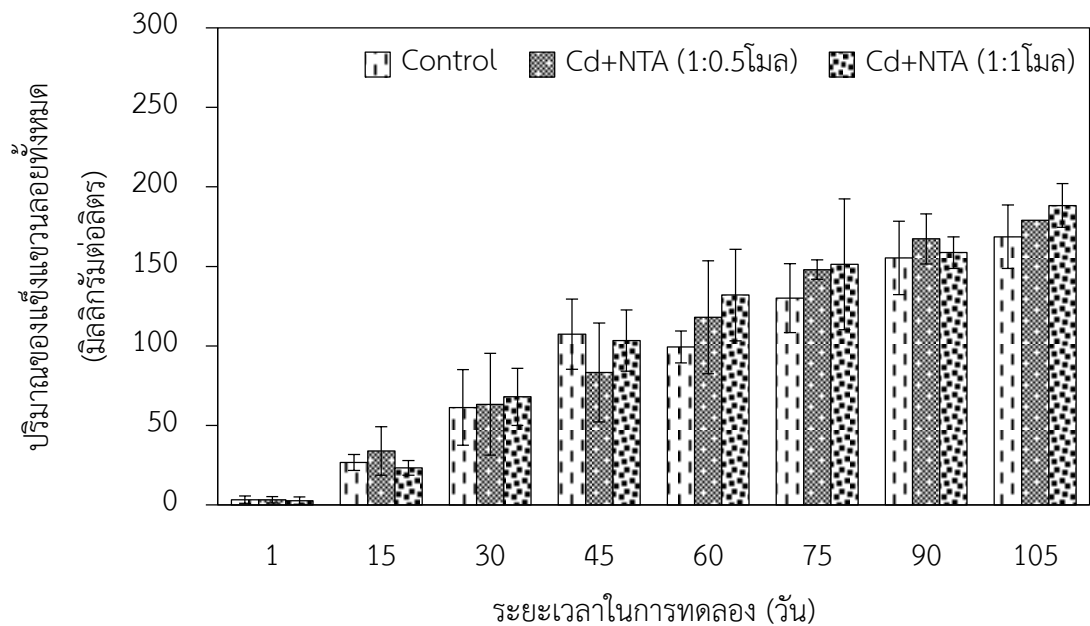
การศึกษาปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากดำเนินการปลูกหญ้าเนเปียร์แคระแล้ว ซึ่งในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นของการทดลองในช่วง 30 วันแรก พบว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์มีปริมาณต่ำกว่าในช่วงระยะเวลาของการทดลองอื่น จากการศึกษาที่ 30 วัน พบว่า มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์น้อยที่สุดในชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอ (EDTA) อัตราส่วน 1:0.5 โมล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 53.33 มิลลิกรัมต่อลิตร (ดังรูปที่ 4.12) โดยอาจมีสาเหตุมาจากหญ้าเนเปียร์แคระยังมีการเจริญเติบโตได้ดี และมีการร่วงหล่นของเศษซากพืชน้อยกว่าระยะเวลาในช่วง 45-105 วัน และยังพบว่า ในทุกชุดการทดลองมีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาทดลอง และมีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์สูงสุดที่ระยะเวลา 105 วัน โดยชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอร่วมกับเอนทีเอ (EDTA+NTA) ที่อัตราส่วน 1:0.5 และ 1:1 โมล มีมากที่สุดเท่ากับ 210.00 และ 236.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมล (ดังรูปที่ 4.13) รองลงมา คือ ชุดการทดลองที่เติมเอนทีเอ (NTA) ที่อัตราส่วน 1:0.5 และ 1:1 โมล มีค่าเท่ากับ 179.00 และ 188.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมล (ดังรูปที่ 4.14) และอันดับสุดท้าย คือ ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอ (EDTA) ที่อัตราส่วน 1:0.5 และ 1:1 โมล มีค่าเท่ากับ 170.00 และ 183.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับอัตราส่วนโดยโมล (ดังรูปที่ 4.12)



รูปที่ 4.12 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม EDTA (n=3)



รูปที่ 4.13 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม EDTA ร่วมกับ NTA (n=3)



รูปที่ 4.14 ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติม NTA (n=3)

จากการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียสังเคราะห์มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากในทุกระยะเวลาของการทดลองได้มีการเติมอากาศตลอดเวลา อาจทำให้เศษซากของหญ้าเนเปียร์แคระร่วงหล่นไปในน้ำได้ รวมทั้งจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่บริเวณรากของหญ้าเนเปียร์แคระและในน้ำช่วยกันย่อยสลายเศษซากต่าง ๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hu และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินระบบรากแช่แบบ Deep flow technique (DFT) ชนิดเติมอากาศ โดยใช้ผักบุ้ง (*Ipomoea aquatica* Forsk.) ในการทดลอง พบว่า ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำเมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่าเท่ากับ 81.53 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายหลังจากการทดลองผ่านไปเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำมีค่าเท่ากับ 91.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น

4.2.2 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

1) ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA)

ผลการศึกษาจากการเก็บตัวอย่างในวันที่ 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่คงเหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ในทุกชุดการทดลองนั้นมีแนวโน้มปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยชุดการทดลองที่เติมสารละลายแคดเมียมและสารอีดีทีเอ (Cd+EDTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 โมล มีปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 32.67, 28.36, 26.33, 23.40, 19.27, 18.24, 16.65 และ 15.11 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง (ดังรูปที่ 4.15) ส่วนชุดการทดลองที่เติมสารละลายแคดเมียมและสารอีดีทีเอ (Cd+EDTA) ที่อัตราส่วน 1:1 โมล มีปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 33.01, 27.37, 20.25, 19.06, 17.12, 15.15, 13.60 และ 12.16 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง (ดังรูปที่ 4.15) โดยพบว่า มีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับชุดควบคุม โดยในชุดควบคุม (Control) มีปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 33.85, 31.83, 59.46, 28.11, 26.30, 25.55, 22.79 และ 19.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง (ดังรูปที่ 4.15) นอกจากนี้ในชุดของการทดลองที่เติมสารละลายแคดเมียมและสารอีดีทีเอ (Cd+EDTA) ในอัตราส่วน 1:1 โมล พบว่ามีปริมาณแคดเมียมที่คงเหลือในน้ำเสียสังเคราะห์น้อยกว่าชุดการทดลองที่เติมสารละลายแคดเมียมและสารอีดีทีเอ (Cd+EDTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 โมล ซึ่งปริมาณแคดเมียมในชุดการทดลองทั้งสองมีปริมาณแคดเมียมที่คงเหลือในน้ำเสียสังเคราะห์น้อยกว่าชุดควบคุม แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของสารอีดีทีเอ (EDTA) ที่มีส่วนช่วยในการดูดซับแคดเมียมได้ดีในหล้าเนเปียร์แคระ และทำให้ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด

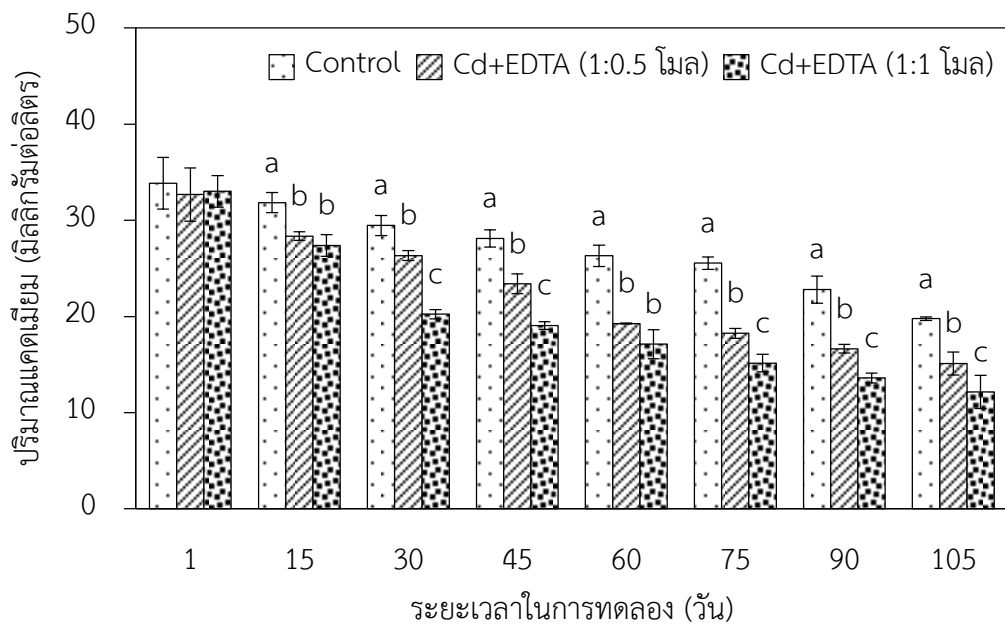
2) ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA)

จากการเก็บตัวอย่างในวันที่ 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน พบว่า ปริมาณแคดเมียมคงเหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) ในวันที่ 1 และ 15 ของการทดลอง มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดควบคุม ส่วนชุดการทดลองในวันที่ 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน พบว่า ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์มีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง และค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับชุดควบคุมในทุกชุดการทดลอง เช่นเดียวกับชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ซึ่งมีปริมาณแคดเมียมคงเหลือในน้ำเสียสังเคราะห์น้อยกว่าในชุดควบคุม โดยในชุดควบคุม (Control) มีปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 33.85, 31.83, 59.46, 28.11, 26.30, 25.55, 22.79 และ 19.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง (ดังรูปที่ 4.16) ส่วนชุดการทดลองที่มีปริมาณแคดเมียมคงเหลือ

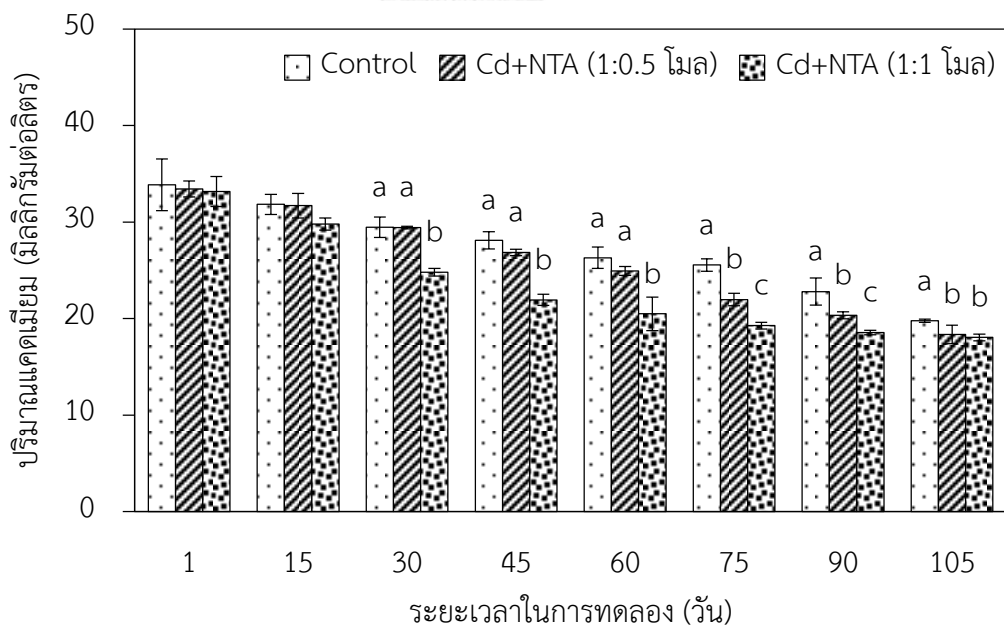
ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่น้อยที่สุด คือ ชุดการทดลองที่เติมสารละลายแคดเมียมและสารเอ็นทีเอ (Cd+NTA) ในอัตราส่วน 1:1 โมล โดยพบว่า มีปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 33.17, 29.80, 24.80, 21.94, 20.49, 19.27, 18.55 และ 18.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง (ดังรูปที่ 4.16) รองลงมา คือ ชุดการทดลองที่เติมสารละลายแคดเมียมและสารเอ็นทีเอ (Cd+NTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 โมล โดยพบว่า มีปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 33.43, 31.70, 29.44, 26.85, 24.93, 21.97 20.33 และ 18.35 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง (ดังรูปที่ 4.16) ตามลำดับ

3) ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอ็นทีเอ (NTA)

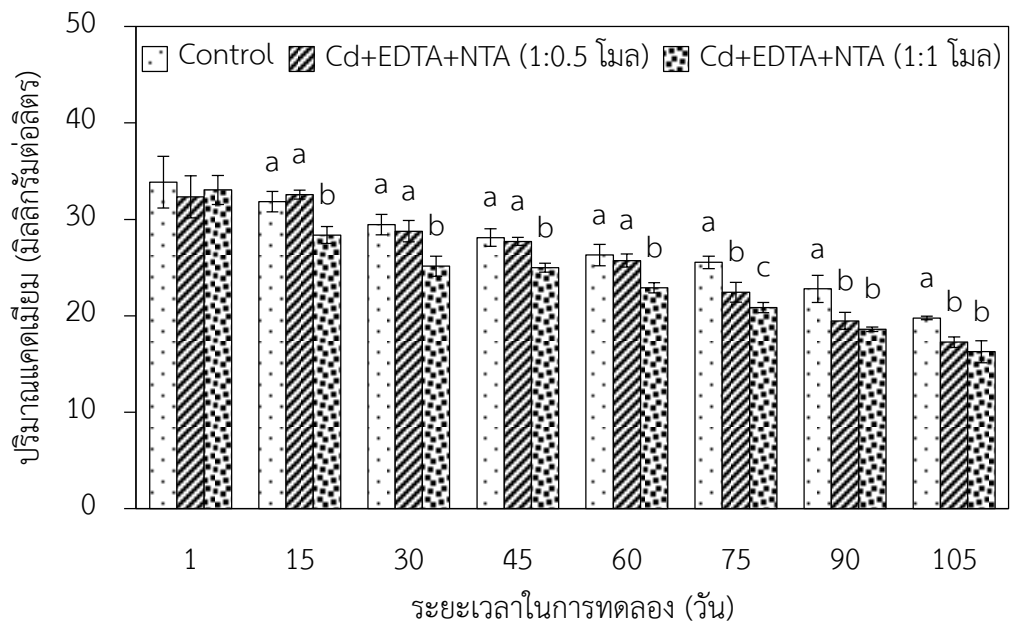
จากผลการเก็บตัวอย่างในวันที่ 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่คงเหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอ็นทีเอ (NTA) มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับชุดควบคุม ในวันที่ 1 หรือวันแรกของการทดลอง ส่วนชุดการทดลองในวันที่ 15, 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน นั้นมีแนวโน้มปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง และค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับชุดควบคุมในทุกชุดการทดลอง เช่นเดียวกับชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) และชุดการทดลองที่เติมสารสารเอ็นทีเอ (NTA) ซึ่งมีปริมาณแคดเมียมที่คงเหลือในน้ำเสียสังเคราะห์น้อยกว่าในชุดควบคุม โดยในชุดควบคุม (Control) มีปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 33.85, 31.83, 29.46, 28.11, 26.30, 25.55, 22.79 และ 19.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง (ดังรูปที่ 4.17) ส่วนชุดการทดลองที่มีปริมาณแคดเมียมคงเหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ที่น้อยที่สุดคือ ชุดการทดลองที่เติมสารละลายแคดเมียม และสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอ็นทีเอ (Cd+EDTA+NTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 โมล มีปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 32.33, 32.57, 28.77, 27.71, 25.73, 22.43, 19.47 และ 17.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง (ดังรูปที่ 4.17) รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมสารละลายแคดเมียม และสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอ็นทีเอ (Cd+EDTA+NTA) ในอัตราส่วน 1:1 โมล มีปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 33.05, 28.37, 25.14, 24.98, 22.92, 20.86, 18.60 และ 16.27 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง (ดังรูปที่ 4.17) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ผลของสารคีเลตทั้งสองชนิด คือ สารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอ็นทีเอ (NTA) นั้นมีส่วนช่วยในการดูดซับแคดเมียมในหลู่วานเปียร์แคระได้ดี และมีส่วนทำให้ปริมาณแคดเมียมในน้ำลดลงอีกด้วย



รูปที่ 4.15 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3)
 หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)



รูปที่ 4.16 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) (n=3)
 หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)



รูปที่ 4.17 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับ สารเอนทีเอ (EDTA+NTA) (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)

4.2.3 ผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ต่อการเติบโตของพืชทดลอง

การศึกษาการเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระ ซึ่งพิจารณาจากน้ำหนักแห้งของพืช โดยทำการเก็บตัวอย่างหญ้าเนเปียร์แคระที่ 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน และนำตัวอย่างหญ้าเนเปียร์แคระมาล้างน้ำให้สะอาดด้วยน้ำประปา 3-4 ครั้ง ล้างด้วยน้ำกลั่น 1 ครั้ง ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการแบ่งหญ้าเนเปียร์แคระออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือลำต้น (ลำต้นและใบ) และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24-48 ชั่วโมง และนำไปชั่งน้ำหนักแห้งในแต่ละส่วนของหญ้าเนเปียร์แคระ สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

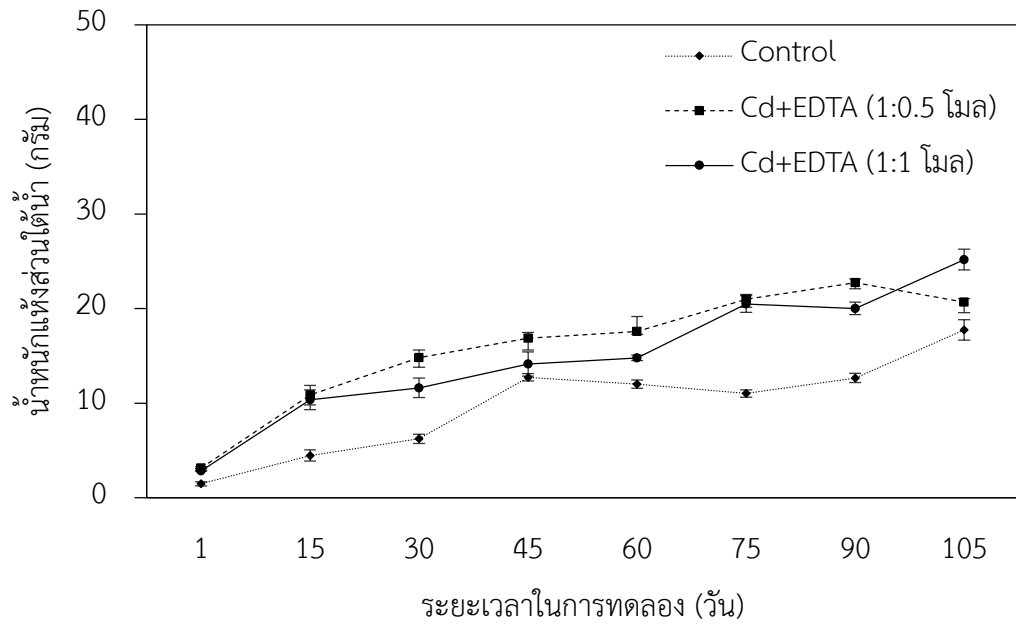
1) การเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก)

ผลการศึกษาการเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของพืชในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ พบว่า น้ำหนักแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการทดลองที่ 15 ถึง 105 วัน โดยในชุดควบคุมมีน้ำแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 1.47, 4.47, 6.23, 12.73, 12.00, 11.02, 12.66 และ 17.74 กรัม ตามลำดับระยะเวลาในการทดลอง (ดังรูปที่ 4.18) สำหรับชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 มีน้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 2.85, 10.36, 11.62, 14.13, 14.79, 20.48, 20.1 และ 25.18 กรัม ที่ระยะเวลา 105 วัน (ดังรูปที่ 4.18) ส่วนชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:0.5 มีน้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 1.13, 5.13, 10.51, 11.59, 11.22, 11.64, 12.60 และ 14.28 กรัม ตามลำดับระยะเวลาในการทดลอง (ดังรูปที่ 4.19) และชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอ (EDTA+NTA) ในอัตราส่วนโดยโมล 1:0.5 มีน้ำหนักแห้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 0.91, 5.91, 9.66, 11.71, 11.89, 11.14, 11.58 และ 16.21 กรัม ตามลำดับระยะเวลาในการทดลอง (ดังรูปที่ 4.20) จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น การเจริญเติบโตในส่วนใต้น้ำของหญ้าเนเปียร์แคระมีมากขึ้น โดยพบมากที่สุดที่ 105 วัน ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 มีค่าเท่ากับ 25.18 กรัม เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารคีเลต โดยค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่า สารอีดีทีเอ (EDTA) ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Evangelou และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดตั้งโลหะหนัก 2 ชนิด คือ ทองแดง และแคดเมียมออกจากดินที่ปนเปื้อนด้วยการปลูกต้นยาสูบ (*Nicotiana tabacum*) โดยเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการเติมสารคีเลต 2 ชนิด ได้แก่ สารอีดีทีเอ (EDTA) และสารอีดีดีเอส (EDDS) ที่ระดับความเข้มข้น 1.5, 3.25, 6.25, 12.5, 25 และ 50 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน และศึกษาการแสดงความเป็นพิษของต้นยาสูบเมื่อเติมสารคีเลต ผลการศึกษา พบว่า สารอีดีทีเอไม่ส่งผลต่อการแสดงความเป็นพิษในต้นยาสูบ และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Grčman และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาถึงการดูดตั้งโลหะหนัก

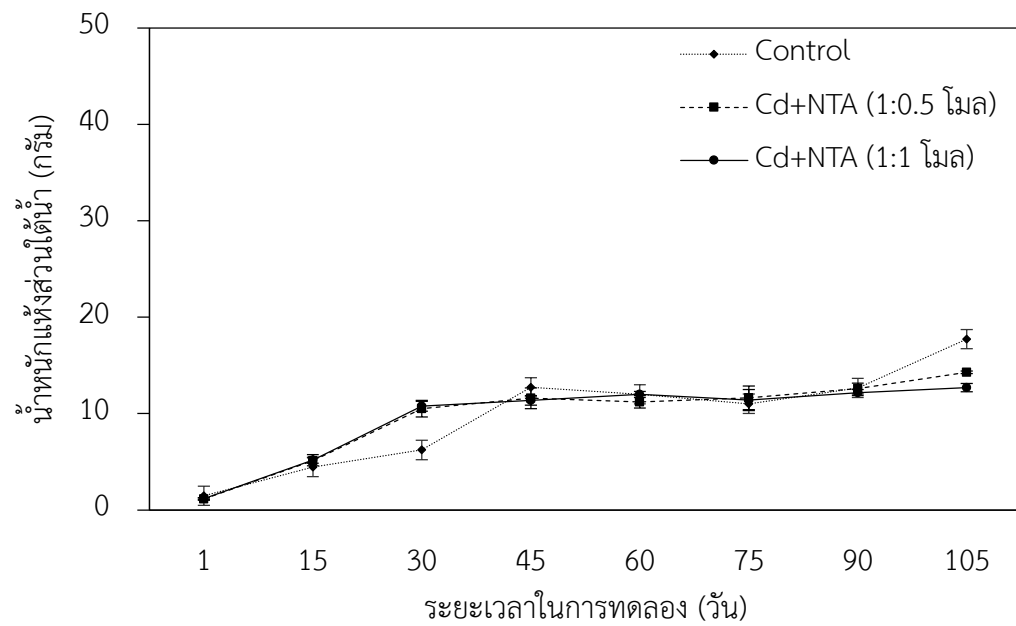
3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม ด้วยการปลูกผักกาดเขียวปลี (*Brassica rapa* L.) โดยมีการเติมสารคีเลต 2 ชนิด คือ สารอีดีทีเอ (EDTA) และสารอีดีดีเอส (EDDS) ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 3, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผลการศึกษา พบว่า สารอีดีทีเอไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของผักกาดเขียวปลี ที่ระดับความเข้มข้น 3 และ 5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน

2) การเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)

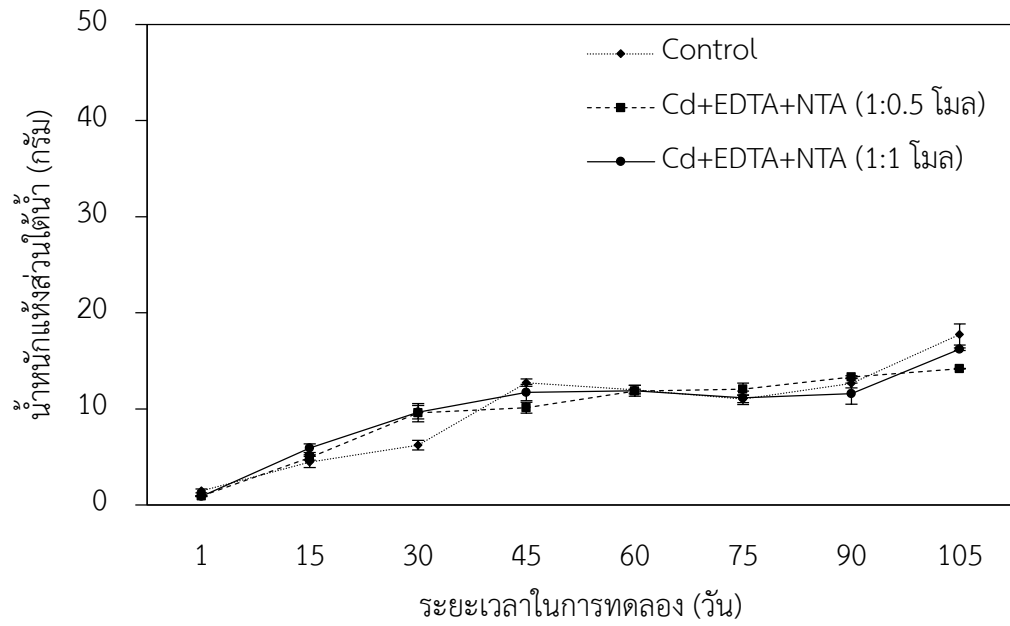
ผลการศึกษาการเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) เพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 105 วัน โดยในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ในอัตราส่วนโดยโมล 1:0.5 มีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) มากที่สุด มีค่าเท่ากับ 29.37 กรัม (ดังรูปที่ 4.21) ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับชุดควบคุมที่ไม่เติมสารอีดีทีเอ มีค่าเท่ากับ 8.31, 9.39, 12.33, 12.56, 15.26, 15.35, 16.38, 18.17 และ 19.53 กรัม ตามลำดับระยะเวลาในการทดลอง สำหรับชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) และชุดการทดลองเติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอ (EDTA+NTA) ในอัตราส่วนโดยโมล 1:1 มีค่าเท่ากับ 21.90 และ 25.18 กรัม ตามลำดับ ที่ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง 105 วัน (ดังรูปที่ 4.22 และ 4.23) นอกจากนี้ยังพบว่า น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ และชุดการทดลองที่สารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอมีน้ำหนักแห้งน้อยกว่าในชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมสารคีเลต อาจเนื่องมาจากการเติมสารอีดีทีเอ และสารเอนทีเอ ลงไปในการทดลองมีส่วนช่วยให้พืชสามารถดูดดึงโลหะหนักได้ดียิ่งขึ้น เมื่อพืชมีการสะสมโลหะหนักมากขึ้นอาจส่งผลทำให้พืชชะงักการเติบโตได้ (จารุวรรณ วงศ์เนศ, 2549) และจากการศึกษายังพบว่า หญ้าเนเปียร์แคระสามารถเติบโตได้ตลอดระยะเวลาในการทดลอง และการเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในทุกชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liphadzi และ Kirkham (2006) ได้ทำการศึกษาดูดดึงโลหะหนัก 7 ชนิด ได้แก่ แคดเมียม สังกะสี ตะกั่ว นิกเกิล แมงกานีส เหล็ก และทองแดงที่ปนเปื้อนในดิน และได้ทำการศึกษาความเป็นพิษของสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 0, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ด้วยต้นทานตะวัน (*Helianthus annuus*) หลังจากการทดลองที่ระยะเวลา 64 วัน พบว่า สารอีดีทีเอไม่มีความเป็นพิษต่อต้นทานตะวัน และเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น พบว่า น้ำหนักแห้งของต้นทานตะวันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น



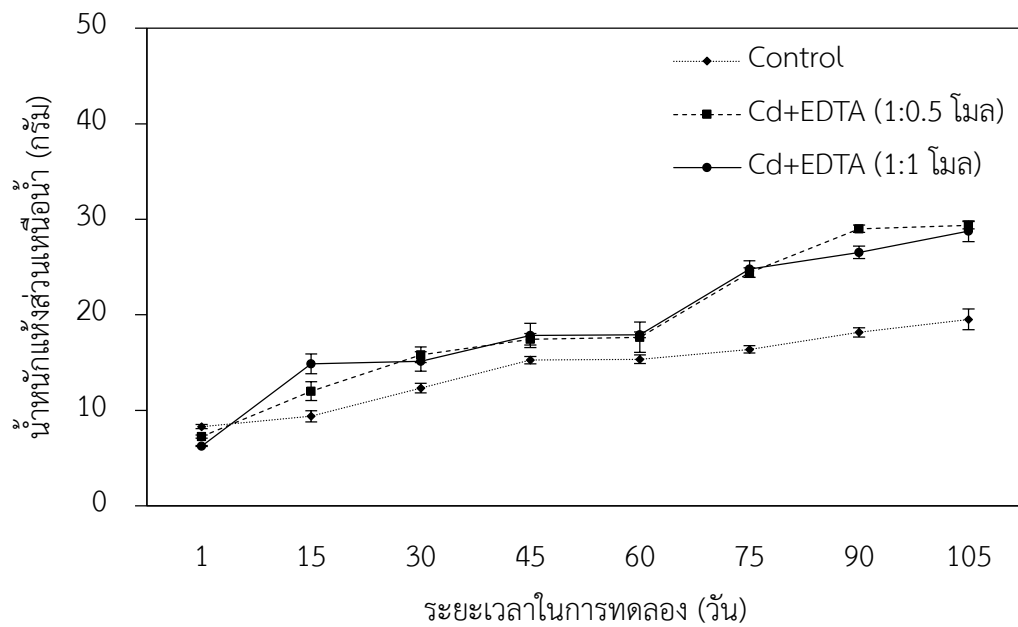
รูปที่ 4.18 น้ำหนักแห้งในส่วนไตน้ำ (ราก) ของชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3)



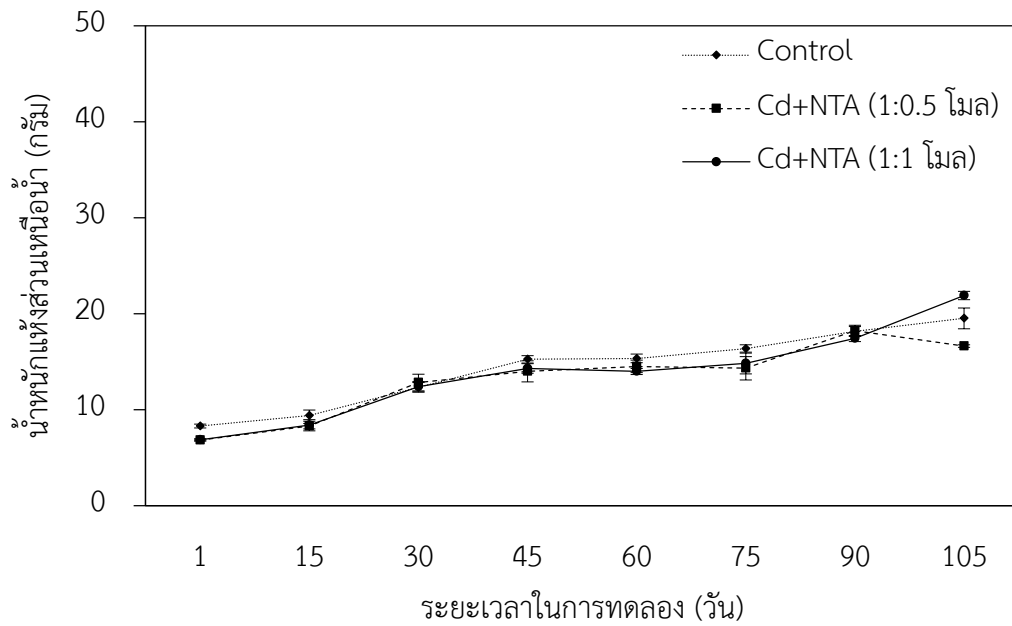
รูปที่ 4.19 น้ำหนักแห้งในส่วนไตน้ำ (ราก) ของชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) (n=3)



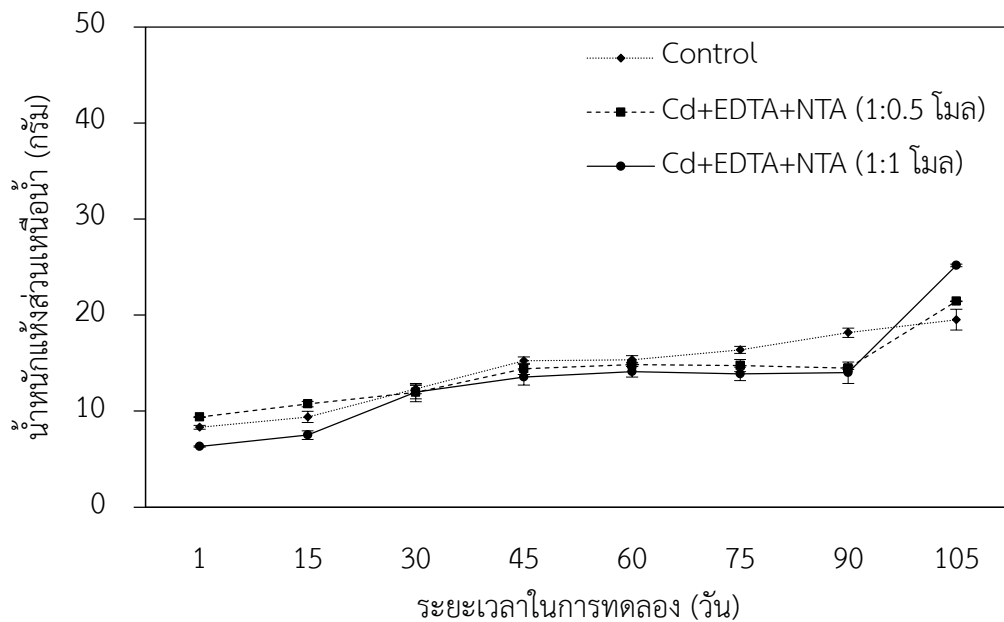
รูปที่ 4.20 น้ำหนักแห้งในส่วนใต้ดิน (ราก) ของ
ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอ (EDTA+NTA) (n=3)



รูปที่ 4.21 น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) ของ
ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3)



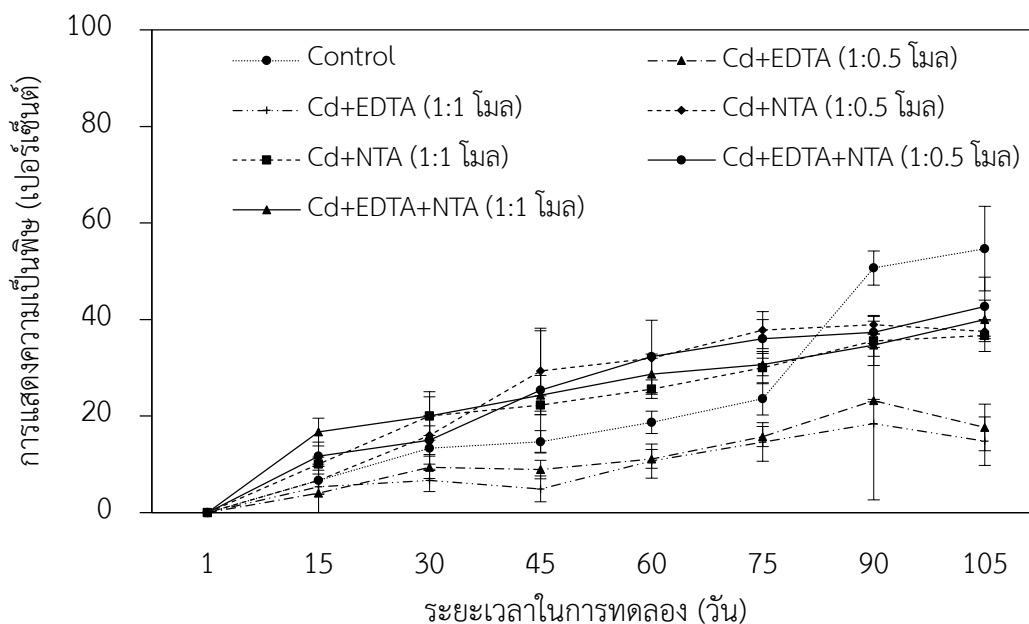
รูปที่ 4.22 น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของชุดการทดลองที่เติม สารเอนทีเอ (NTA) (n=3)



รูปที่ 4.23 น้ำหนักแห้งในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของชุดการทดลองที่เติม สารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอ (EDTA+NTA) (n=3)

4.2.4 การแสดงความบั่นพิษของพืช (Phytotoxicity)

ผลการศึกษาเปรียบเทียบการแสดงความบั่นพิษของพืช จากเกณฑ์การให้น้ำหนักคะแนนตามวิธีการของ Brown และคณะ (1991) โดยการประเมินจากการสังเกตด้วยสายตา และบันทึกข้อมูลที่เกิดขึ้นในวันที่ 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน จากนั้นนำผลการประเมินมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ความบั่นพิษที่พืชได้รับจากจำนวนใบของพืช ผลการศึกษาพบว่า ที่ระยะเวลา 105 วันของการทดลอง เปอร์เซ็นต์การแสดงความบั่นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดควบคุมมีเปอร์เซ็นต์การแสดงความบั่นพิษสูงสุด มีค่าเท่ากับ 0.00, 6.67, 13.33, 14.67, 18.67, 23.56, 50.67 และ 54.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับของระยะเวลาในการทดลอง (ดังรูปที่ 4.24) สำหรับในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ในอัตราส่วน 1:1 พบว่า มีเปอร์เซ็นต์การแสดงความบั่นพิษน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.00, 5.33, 6.67, 4.89, 10.67, 14.60, 18.41 และ 14.76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ของระยะเวลาในการทดลอง (ดังรูปที่ 4.24) ซึ่งสารคีเลตที่เติมลงไปในการทดลองนอกจากจะช่วยทำให้หญ้าเนเปียร์แคระดูดดึงแคดเมียมไปสะสมได้ดีแล้วยังช่วยลดความบั่นพิษจากแคดเมียมลง เนื่องจากสารคีเลตสามารถรวมตัวกับพวกแคดไอออนได้ ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า คีเลชัน (Chelation) โดยสารคีเลตไปห่อหุ้มแคดไอออนของธาตุที่เป็นโลหะไว้ และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งทำให้พืชมีความบั่นพิษน้อยลง (Wang et al. 1992; Keltjens และ Van Beusichem 1998) และจากการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การแสดงความบั่นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระมีแนวโน้มมากขึ้น เมื่ออายุของหญ้าเนเปียร์แคระ และระยะเวลาในการสังเกตความบั่นพิษเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hernández-Allica และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0, 250, 500 และ 750 ไมโครโมล ในโลหะหนัก 3 ชนิด คือ ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียม ด้วยการปลูกต้นอาร์ทิโชก (*Cynara cardunculus* L.) ปลูกแบบไร้ดิน (Hydroponics) ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มการเติมสารอีดีทีเอลงไปในการทดลองทำให้ผลความบั่นพิษของโลหะหนักต่อพืชลดลง และมีความเป็นไปได้มากที่สุดที่ Pb^{2+} Zn^{2+} และ Cd^{2+} ที่อยู่ในสารละลายส่งผลต่อความบั่นพิษของพืช ทั้งนี้เนื่องจากโลหะหนักมีความบั่นพิษสูงกว่าโลหะหนักที่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอีดีทีเอ (Geebelen และคณะ, 2002) อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะการแสดงความบั่นพิษอันเกิดจากการขาดธาตุอาหาร และการแสดงความบั่นพิษที่เกิดจากโรคพืช (ดังภาคผนวก ก ตารางที่ ก 1-2)

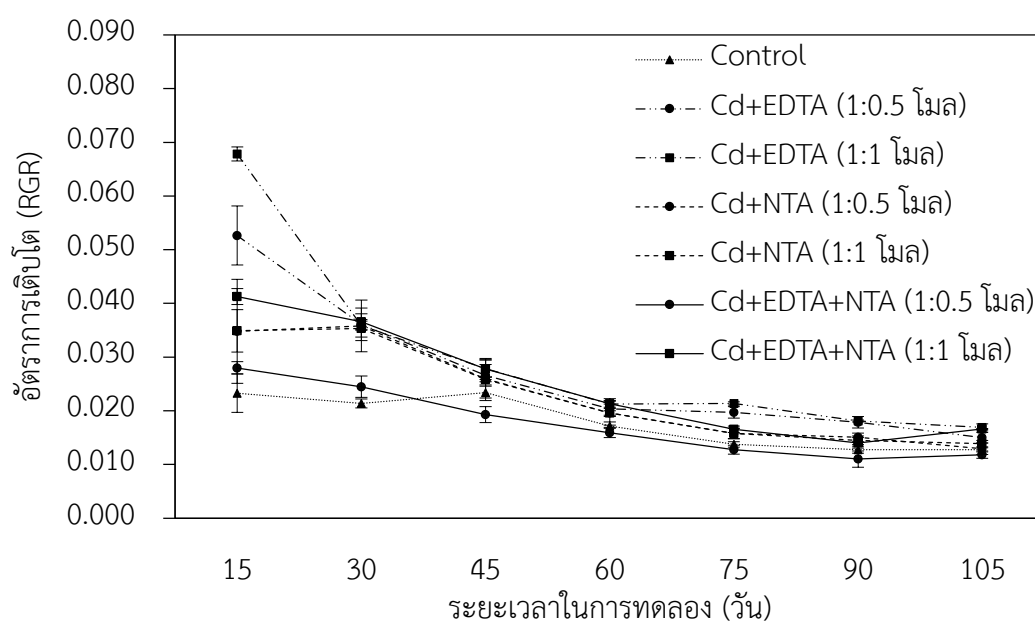


รูปที่ 4.24 การแสดงความล้มเหลวของหญ้าเนเปียร์แคระที่ระยะเวลาต่าง ๆ

4.2.5 อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคระ (Relative growth rate; RGR)

การศึกษาอัตราการเติบโตสัมพัทธ์ (Relative growth rate; RGR) (Hoffmann และ Poorter, 2002) พิจารณาได้จากน้ำหนักแห้งของพืช ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสง เพราะเป็นอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งต่อหน่วยเวลา เมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้น หรือเป็นการบ่งบอกถึงอัตราการเติบโตต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักต้นที่มีอยู่ ผลการศึกษาอัตราการเติบโตสัมพัทธ์ พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระในทุกชุดการทดลองมีอัตราการเติบโตสัมพัทธ์ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป (ดังรูปที่ 4.25) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งแคดเมียมไม่ใช่ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช โดยมีผลต่อกระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolism) ทำให้อวัยวะของพืชบางส่วนเสียหาย ส่งผลให้เนื้อเยื่อพืชไม่สามารถสังเคราะห์อาหารได้ และเมื่อแคดเมียมเข้าไปทำลายเซลล์และเนื้อเยื่อคลอโรพลาสต์ (Chloroplast) จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง และส่งผลให้ราก ลำต้น ใบ และมวลชีวภาพของพืชลดลง รวมทั้งลดความสูงของลำต้น อัตราการงอก การแตกกิ่ง ผลผลิตลง อัตราการเจริญเติบโตลดลง และส่งผลให้พืชตายได้ในที่สุด และยังพบว่า ในชุดการทดลองที่มีการเติมสารคีเลตซึ่งมีส่วนช่วยในการเจริญเติบโตของพืชในทุกชุดการทดลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งชุดที่มีการเติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ในอัตราส่วนโดยโมล 1:1 มีอัตราการเติบโตสัมพัทธ์ เท่ากับ 0.0678, 0.0359, 0.0279, 0.0213, 0.0214, 0.0181 และ 0.0169 ตามลำดับ ระยะเวลาในการทดลอง (ดังรูปที่ 4.25) แต่ในขณะเดียวกันเมื่อพืชมีการดูดซับสารอีดีทีเอเพิ่มขึ้นอาจส่งผลให้อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ลดลง ซึ่งการทดลองครั้งนี้มีความสอดคล้อง

กับงานวิจัยของ Lu และคณะ (2004) ที่ได้ทำการศึกษาการกำจัดแคดเมียม และสังกะสีด้วยผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม เท่ากับ 0.5, 1, 2 และ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการเก็บตัวอย่างที่ 0, 4, 8 และ 12 วัน พบว่า การเติบโตสัมพัทธ์ในชุดการทดลองแคดเมียมเท่ากับ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเท่ากับ 0.85 ที่ 12 วัน ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.25 อัตราการเติบโตสัมพัทธ์ของหญ้าเนเปียร์แคะที่ระยะเวลาต่าง ๆ

4.2.6 ผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ต่อการดูดตั้งแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ

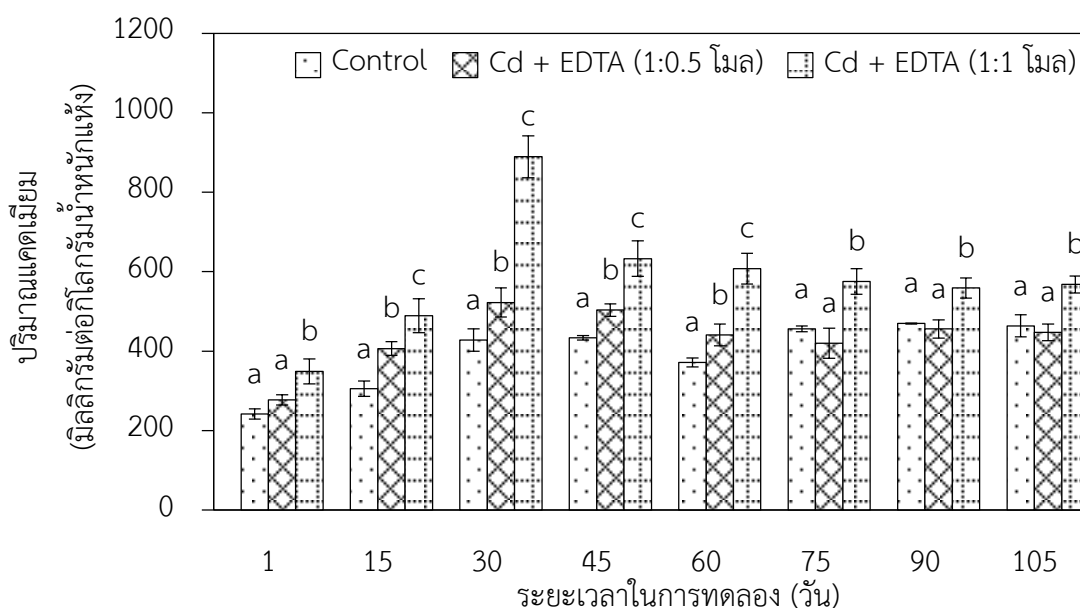
ผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ต่อการดูดตั้งแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือหน้า (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ สามารถสรุปผลการศึกษาและแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1) ปริมาณการดูดตั้งแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระเมื่อเติมสารอีดีทีเอ (EDTA)

จากการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระของชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 โมล และอัตราส่วน 1:1 โมล พบว่า สารคีเลตมีส่วนช่วยในการดูดตั้งแคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ไว้ในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในปริมาณมากกว่าในส่วนเหนือหน้า (ลำต้น และใบ) ในทุกช่วงระยะเวลาของการทดลอง คือ 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน ซึ่งผลของการสะสมแคดเมียมมีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับชุดควบคุม (ดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข 1-8) โดยชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ในอัตราส่วน 1:1 โมล มีผลต่อการดูดตั้งแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์มากกว่าชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ที่ระดับความเข้มข้นอัตราส่วนโดยโมลอื่น โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 349.10, 489.23, 889.31, 632.84, 607.73, 575.07, 559.05 และ 567.82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของระยะเวลาเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.26) โดยค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P \leq 0.05$) รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 โมล โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 276.96, 406.27, 522.38, 503.23, 440.99, 419.75, 455.69 และ 447.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของระยะเวลาเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.26) นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบว่า ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ในอัตราส่วน 1:1 โมล มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) มากที่สุดมีค่าเท่ากับ 889.31 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ที่ระยะเวลา 30 วัน และเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ปริมาณการสะสมแคดเมียมมีแนวโน้มลดลง

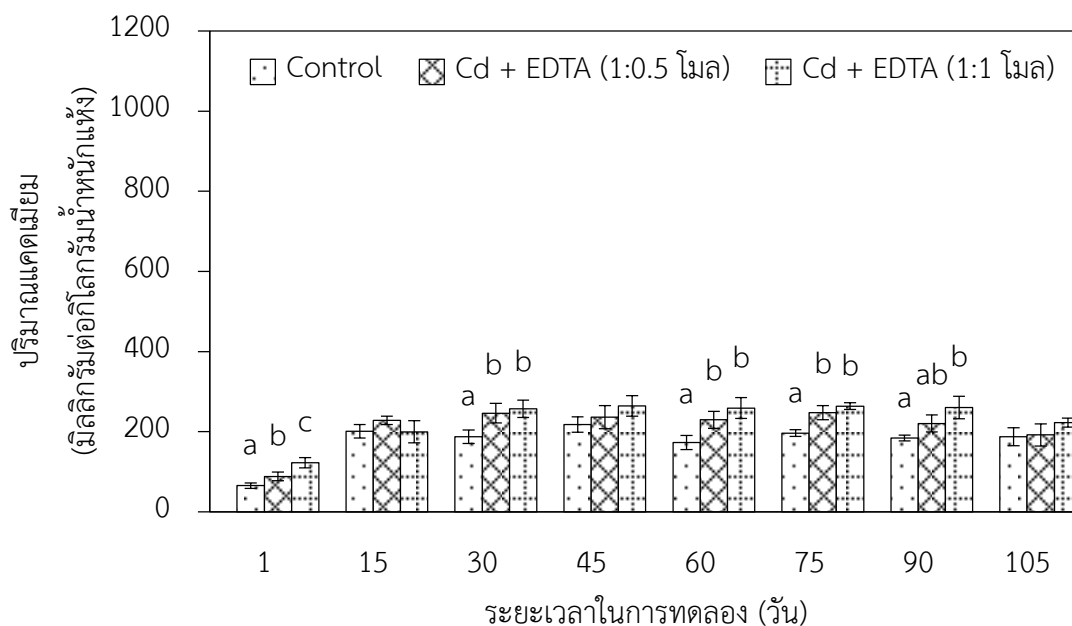
สำหรับปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือหน้า (ลำต้นและใบ) ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) พบว่า ที่ระยะเวลา 30, 45, 60, 75 และ 90 วัน มีแนวโน้มของการสะสมแคดเมียมมากกว่าชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัด และค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (ดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข 9-16) โดยชุดการทดลองที่มีการเติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ในอัตราส่วน 1:1 โมล มีส่วนช่วยในการดูดตั้งแคดเมียมไปสะสมไว้ในส่วนเหนือหน้า (ลำต้นและใบ) มากที่สุด สำหรับปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือหน้า (ลำต้นและใบ) และในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ในอัตราส่วน 1:1 โมล ปริมาณการสะสมแคดเมียม เท่ากับ 122.79, 199.80,

256.97, 264.50, 259.05, 263.88, 260.45 และ 222.78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของระยะเวลาเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.27) รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 โมล โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) เท่ากับ 88.46, 228.33, 246.28, 236.16, 229.66, 247.39, 220.52 และ 191.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของระยะเวลาเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.27) อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ทุกชุดการทดลองมีการสะสมแคดเมียมแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากความเป็นพิษของแคดเมียมที่เริ่มต้นสะสมตั้งแต่เริ่มทำการทดลองซึ่งอาจทำให้หญ้าเนเปียร์แคระแสดงความเป็นพิษจึงอาจทำให้ประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระลดลงด้วย ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ในชุดการทดลองมีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมไปไว้ในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระได้เพิ่มมากขึ้น ผลจากการศึกษาค้นคว้านี้จึงมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lai และ Chen (2004) ที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าใช้สารอีดีทีเอ (EDTA) ในการช่วยเพิ่มการดูดดึงแคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว ด้วยการปลูกพืชทดลอง ได้แก่ ฝั่สื้อ (*Dianthus chinensis*) และหญ้าแฝก (*Vetiver zizanioides*) ผลการศึกษพบว่า สารอีดีทีเอ (EDTA) ช่วยในการดูดดึงโลหะหนักได้ดีขึ้น โดยมีการสะสมโลหะหนักในรากมากกว่าลำต้นและใบ



รูปที่ 4.26 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนได้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)



รูปที่ 4.27 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)

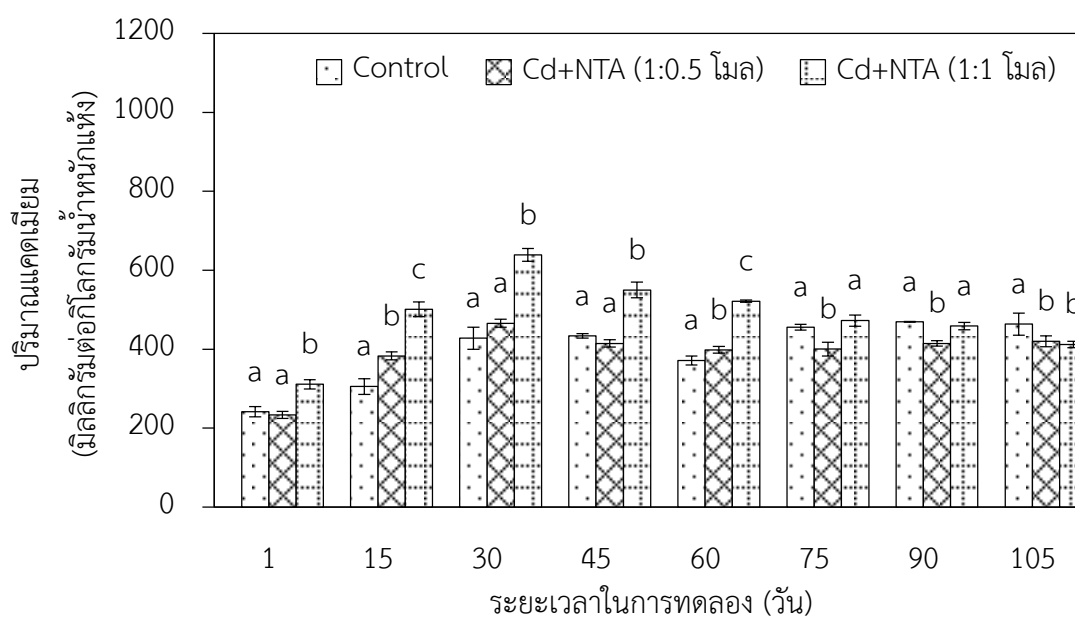
นอกจากนี้สารอีดีทีเอ (EDTA) ยังมีส่วนช่วยในการเคลื่อนที่ของแคดเมียม สังกะสี และ ตะกั่วไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืชทั้งสองชนิดได้ดีขึ้น และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhao และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษากการสะสมตัวของโลหะหนักสองชนิดคือ ตะกั่ว และสังกะสี ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 0, 0.5, 1 และ 2 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม โดยการเติมสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารดีทีพีเอ (DTPA) พืชที่ใช้ทดลองคือ หญ้าไรย์ (*Lolium perenne* L.) ผลการศึกษาพบว่า มีการสะสมของตะกั่ว และสังกะสีในส่วนใต้น้ำ (ราก) สูงสุดเท่ากับ 2,730.54 และ 2,428.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีการสะสมของตะกั่ว และสังกะสีในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) สูงสุดเท่ากับ 2,484.42 และ 2,010.43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยชุดการทดลองที่ไม่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารดีทีพีเอ (DTPA) มีการสะสมของตะกั่ว และสังกะสีในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 2,345.41 และ 1,952.24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีการสะสมของตะกั่ว และสังกะสีในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) สูงสุดเท่ากับ 1,325.23 และ 1,235.27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การเติมสารคีเลตนั้นสามารถช่วยให้พืชดูดตั้งโลหะหนักได้มากกว่าการไม่เติมสารคีเลตใด ๆ

2) ปริมาณการดูดตั้งแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระเมื่อเติมสารเอนทีเอ (NTA)

ผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ในช่วงระยะเวลาของการทดลอง คือ 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน พบว่า ชุดการทดลอง ที่การดูดดึงแคดเมียมมากที่สุด คือ ชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) ในอัตราส่วน 1:1 โมล ซึ่งมีปริมาณการสะสมแคดเมียมมีค่าสูงสุดเท่ากับ 638.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งที่ 30 วัน ซึ่งผลของการสะสมแคดเมียมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) ที่ระดับความเข้มข้นอัตราส่วนโดยโมลอื่น (ดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข 16-24) และยังพบว่า ชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) ในอัตราส่วน 1:1 โมล มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) อยู่ในช่วง 311.11-638.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งหรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 311.11, 500.86, 638.98, 549.97, 521.72, 472.39, 458.53 และ 411.81 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของระยะเวลาการทดลอง (ดังรูปที่ 4.28) รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 โมล มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 233.53, 383.06, 465.71, 414.65, 398.51, 400.14, 414.38 และ 420.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของระยะเวลาเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.28) ผลการศึกษายังพบว่า ปริมาณการดูดดึงแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระมีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมมากกว่าในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Quartacci และคณะ (2007) ที่ได้ศึกษาสารคีเลตสองชนิด คือ NTA และ EDDS ในการสะสมโลหะหนัก 5 ชนิด คือ As, Cd, Cu, Pb และ Zn ด้วยพืช *Brassica carinata* พบว่า ในชุดการทดลองที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 75 ไมโครโมล (μM) และทำการเติม NTA 10 ไมโครโมล (μM) โดยวิธีปลูกพืชแบบไร้ดิน ผลการศึกษาพบว่า NTA มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมของพืชได้มากขึ้น โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนรากมากกว่าลำต้นและใบ

สำหรับปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) พบว่า ที่ระยะเวลา 1, 30, 60 และ 90 วัน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากกว่าชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (ดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข 24-32) ส่วนในระยะเวลาอื่นของชุดการทดลองอื่น พบว่า ค่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยชุดการทดลองที่มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมไปสะสมไว้ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) มากที่สุดคือ ชุดการทดลองที่เติมเอนทีเอ (NTA) ในอัตราส่วน 1:1 โมล พบว่า มีค่าการสะสมแคดเมียมเท่ากับ 120.73, 194.83, 255.25, 226.87, 223.04, 200.99 209.13 และ 193.69 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของระยะเวลาเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.29) รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมเอนทีเอ (NTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 โมล โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) เท่ากับ 85.17, 189.40, 240.39, 229.35, 220.42, 216.97, 218.68 และ 181.41 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของระยะเวลาเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.29) ซึ่งมี

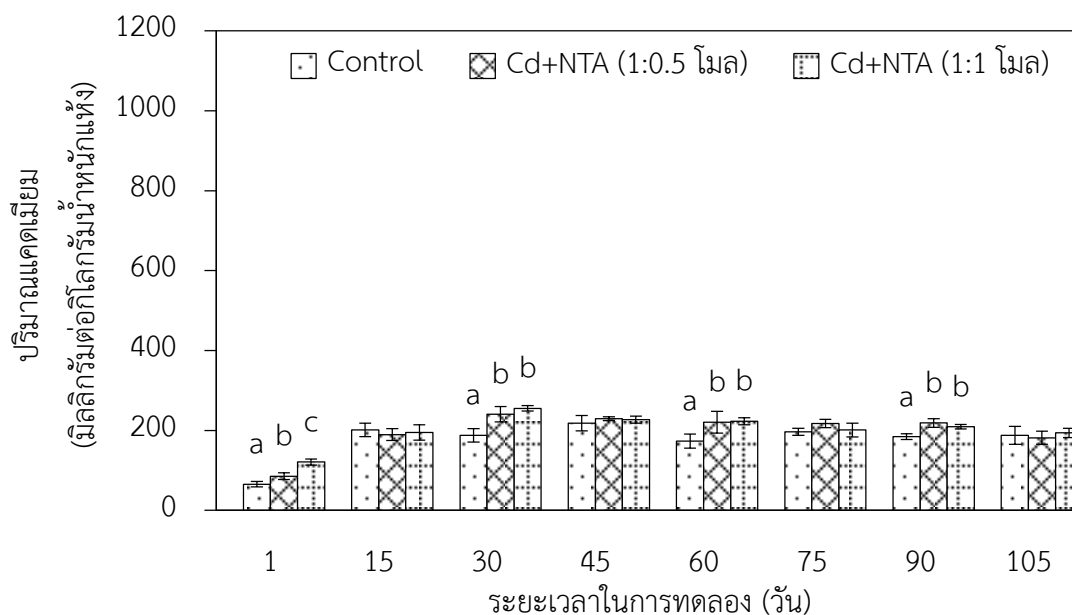
แนวโน้มการสะสมแคดเมียมที่เพิ่มขึ้นในทุกระยะเวลาการทดลอง แสดงให้เห็นว่า สารเอนทีเอ (NTA) มีส่วนช่วยในการดูดดึงแคดเมียมไปสะสมไว้ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ได้มากขึ้น แต่มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) น้อยกว่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) อย่างเห็นได้ชัด ผลจากการทดลองในครั้งนี้จึงมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hseu และคณะ (2013) ที่ได้ศึกษาการใช้สารคีเลต 2 ชนิด คือ EDDS และ NTA ในการสะสมโลหะหนักแคดเมียม โดยใช้พืช *Ipomoea aquatic* Forsk. พบว่า การเติมสารคีเลต EDDS และ NTA ช่วยเพิ่มการดูดดึงแคดเมียมได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.28 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ

ในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)



รูปที่ 4.29 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ ในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) (n=3)

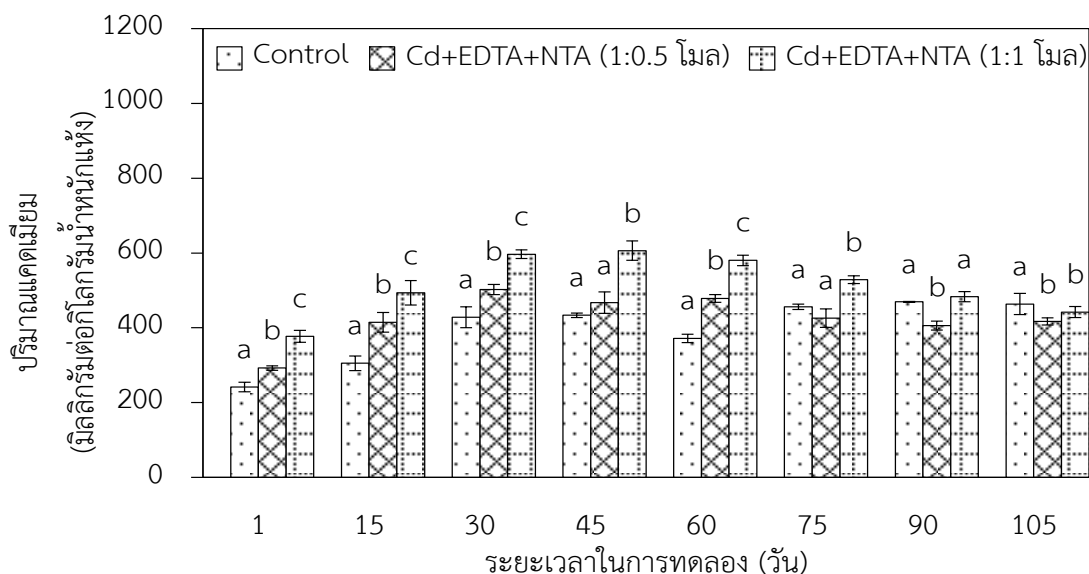
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)

3) ปริมาณการดูดซับแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระเมื่อเติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA)

ผลการศึกษาชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 โมล และอัตราส่วน 1:1 โมล พบว่า ในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระมีการสะสมแคดเมียมมากกว่าในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ในทุกช่วงระยะเวลาของการทดลอง คือ 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน (ดังรูปที่ 4.30) โดยชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA) ในอัตราส่วน 1:1 โมล มีผลต่อการดูดซับแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ไปไว้ในส่วนใต้น้ำ (ราก) มากที่สุด มีค่าเท่ากับ 377.13, 493.97, 596.59, 606.25, 580.44, 528.57, 483.05 และ 442.04 มิลลิกรัมต่อลิตรน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของระยะเวลาเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.30) โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุดที่ 45 วัน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 606.25 มิลลิกรัมต่อลิตรน้ำหนักแห้ง ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (ดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข 33-40) กับชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA) ที่ระดับอัตราส่วนอื่นโดยโมล รวมทั้งชุดควบคุมด้วย รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA)

ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 โมล มีค่าเท่ากับ 292.54, 414.53, 502.70, 467.45, 478.43, 425.60, 406.18 และ 416.78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของระยะเวลาเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.30) จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA) เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Turan และ Esringu (2007) ที่ศึกษาการดูดซับแคดเมียม พรอท ตะกั่ว และสังกะสี ด้วยผักกาดก้านขาว (*Brassica napus* L.) ในดิน มีระดับความเข้มข้นของสารอีดีทีเอ เท่ากับ 0, 3, 6 และ 12 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม (mmol/kg) พบว่า การเติมสารอีดีทีเอ (EDTA) มีผลทำให้พืชทดลองมีการสะสมโลหะทั้ง 5 ชนิดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในส่วนรากที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Guo และคณะ (2011) ที่ได้ศึกษาผลของสารอีดีทีเอ 3 ชนิด คือ อีดีทีเอ กรดซิตริก และ เอนทีเอ ในการช่วยดูดซับทองแดงและสังกะสีด้วยพืชตั้งโอ (*Chrysanthemum coronarium*) ผลการศึกษาพบว่า อีดีทีเอและเอนทีเอมีส่วนช่วยในการดูดซับโลหะหนักมากกว่ากรดซิตริก ซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณการดูดซับทองแดงและสังกะสีในส่วนรากมากกว่าในส่วนลำต้นและใบ

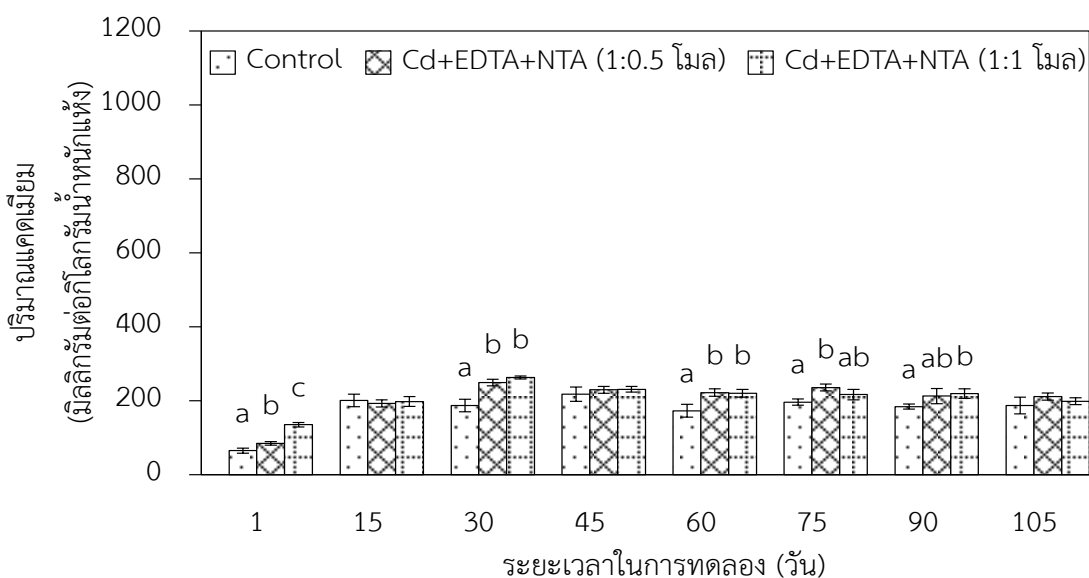
สำหรับปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 โมล และอัตราส่วน 1:1 โมล มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากกว่าชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัด โดยค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (ดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข 40-48) โดยชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA) ที่อัตราส่วน 1:1 โมล มีส่วนช่วยในการดูดซับแคดเมียมไปไว้ในส่วนของลำต้นและใบมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 135.53, 197.88, 263.25, 231.05, 220.50, 217.02, 219.68 และ 198.81 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของระยะเวลาเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.31) รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA) ในอัตราส่วน 1:0.5 โมล โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นและใบ มีค่าเท่ากับ 84.98, 193.06, 249.61, 230.03, 222.12, 236.08, 213.07 และ 211.47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับของระยะเวลาเก็บตัวอย่าง (ดังรูปที่ 4.31) โดยทุกระดับความเข้มข้นมีแนวโน้มของการสะสมแคดเมียมลดลงเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น จากผลการศึกษาข้างแสดงให้เห็นว่า การเติมสาร EDTA ร่วมกับ NTA มีส่วนช่วยในการดูดซับแคดเมียมไปไว้ในส่วนต่างๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sun และคณะ (2001) ที่ได้ศึกษาการใช้สารอีดีทีเอ (EDTA) เพื่อเพิ่มความสามารถในการสะสมของพืช 2 ชนิด ได้แก่ ข้าวโพด (*Zea mays* L.) และ *Thaaspi caeruscens*. ผลการศึกษาพบว่า สาร EDTA ช่วยเพิ่มความสามารถในการสะสมแคดเมียมในพืชทั้งสองชนิดได้



รูปที่ 4.30 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนได้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ

ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA) (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)



รูปที่ 4.31 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนหน่อ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ

ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA) (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)

4) การเปรียบเทียบผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และผลของสารเอนทีเอ (NTA) ต่อการดูดซับแคดเมียมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ

จากการศึกษาผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และเอนทีเอ (NTA) สามารถนำมาเพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่เติมสารคีเลตในแต่ละระดับความเข้มข้น โดยพบว่า ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) มีปริมาณการดูดซับแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) ในทุกระดับความเข้มข้น รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA) และชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.11) โดยมีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในอัตราส่วน 1:1 โมล และเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) จากการศึกษพบว่า ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) มีปริมาณการสะสมแคดเมียมมากที่สุดเช่นเดียวกับส่วนใต้น้ำ (ดังตารางที่ 4.12) แสดงให้เห็นได้ว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีความสามารถในการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) มากที่สุดเท่ากับ 889.31 และ 264.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งพืชมีปริมาณการสะสมแคดเมียมได้ในปริมาณที่สูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง หรือมากกว่า 0.01 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง (Chen และคณะ, 2004) จึงสามารถระบุได้ว่าหญ้าเนเปียร์แคระเป็นพืชที่สามารถสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณที่มากเป็นพิเศษ หรือเรียกว่า ไฮเปอร์แอคคิวมิวเลเตอร์ (Hyperaccumulator plants) ซึ่งวัดได้จากค่าปริมาณการสะสมแคดเมียมต่อน้ำหนักแห้งของพืช และพืชใช้กลไกการสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) หรือการสะสมสารมลพิษในพืช (Phytoaccumulation) ในการลำเลียงแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยผ่านส่วนใต้น้ำ (ราก) ขึ้นไปสู่ส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ได้ในปริมาณที่สูง (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558) การศึกษาในครั้งนี้จึงมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Schor-Fumbarov และคณะ (2003) ที่ได้ทำการศึกษผลของการเติมสาร อีดีทีเอ (EDTA) ในการดูดซับแคดเมียม โดยใช้บัวตลับนาค (*Nymphaea aurora*) ด้วยวิธีการปลูกแบบไร้ดิน ผลการศึกษาพบว่า สารอีดีทีเอมีส่วนช่วยในการดูดซับแคดเมียมได้เพิ่มมากขึ้นทั้งในส่วนใต้น้ำราก และลำต้นใบ และยังมีปริมาณการสะสมแคดเมียมสูงสุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) ซึ่งการเติมสารอีดีทีเอ (EDTA) นั้นสามารถช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยพืช (Phytoremediation) ให้เพิ่มสูงขึ้นอีกด้วยวิธีดังกล่าวจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการบำบัดสารมลพิษจากแหล่งมลพิษต่าง ๆ ได้

สำหรับการศึกษาผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และเอนทีเอ (NTA) ในหญ้าเนเปียร์แคระพบว่า มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) สูงที่สุดในวันที่ 30 ของการทดลอง และมีปริมาณการสะสมแคดเมียมลดลงในช่วงระยะเวลาการทดลองที่เพิ่มขึ้น ตั้งแต่ระยะเวลาที่ 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน ซึ่งสาเหตุในการลดลงของปริมาณแคดเมียมนั้น เนื่องมาจากพืชมีการเจริญเติบโตได้ดีเมื่อระยะเวลาของการทดลองมากขึ้น จึงส่งผลให้มวลชีวภาพ

(Biomass) เพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดการลดระดับความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมไนเตรทเทตระไฮเดรท (Cadmiumnitrate tetrahydrate; $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ในพีชลงได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2005) ที่ศึกษาการดูดตั้งโครเมียมของพีช 5 ชนิด ได้แก่ หญ้าแพรก (*Cynodon dactylon* L. Pers) หญ้าแฝกดอน (*Vetiveria nemoralis* A. Camus) หญ้าข้าวนก (*Echinochloa colonum* L. Link) ต้นก้างปลา (*Phyllanthus reticulatus* Poir) และต้นขลุ่ย (*Pluchea indica* Less.) ที่ระดับความเข้มข้นของโครเมียม 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน พบว่า ที่ระยะเวลา 30 วัน มีการสะสมปริมาณโครเมียมทั้งหมดสูงกว่าที่ระยะเวลา 60 และ 90 วัน เนื่องจาก ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวนี้ ทำให้พีชมีการเจริญเติบโตที่ดี และส่งผลให้มวลชีวภาพของพีชเพิ่มขึ้น โดยมีผลทำให้ความเข้มข้นของโครเมียมในพีชลดลง จึงทำให้มีการสะสมปริมาณโครเมียมทั้งหมด น้อยลงกว่าวันที่ 30 ของการทดลอง

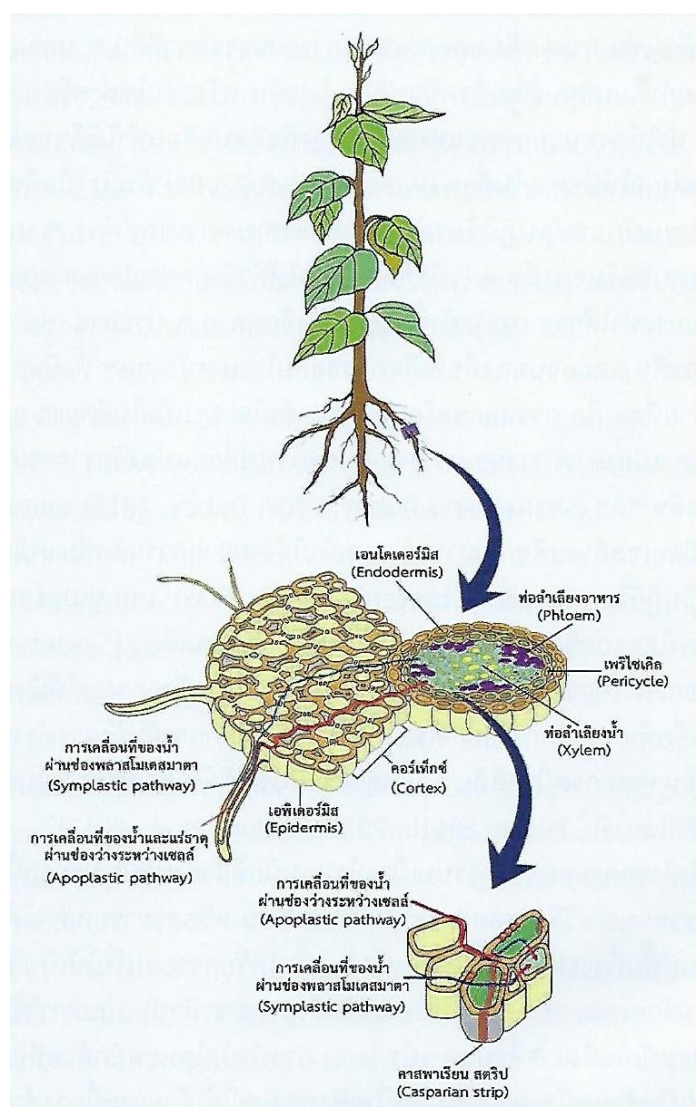
5) กลไกการดูดตั้งโลหะหนักด้วยพีช

สำหรับกลไกการดูดตั้งแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระ เป็นกระบวนการที่โลหะหนัก ถูกดูดตั้งเข้าสู่รากของพีชพร้อมกันกับน้ำที่รากของพีชดูดตั้งเข้ามา (Welch และ Norvell, 1999) การเคลื่อนที่ของน้ำประกอบไปด้วยกระบวนการหลัก 2 วิธีการ คือ (ดังรูปที่ 4.32)

1) วิธีอะโพลลาสต์ติก (Apoplastic pathway) เป็นการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่าง เซลล์ของรากพีช ซึ่งเป็นกลไกที่ไม่ต้องใช้พลังงานจากกระบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์พีช (Passive transport) โดยอาศัยวิธีการแพร่ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของระดับพลังงาน จากที่มี พลังงานสูงไปยังที่มีพลังงานต่ำ เมื่อน้ำเข้ามาถึงชั้นเนื้อเยื่อเอนโดเดอริส (Endodermis) ที่มีสาร ชูเบอร์ิน (Suberin) ซึ่งเป็นสารเสมือนไขมัน และไม่ละลายน้ำเคลือบอยู่เป็นแนวกั้น คือ บริเวณแถบ แคสพาเรียนสตรีพ (Casparianstrip) จึงทำให้น้ำจะผ่านไปได้ (เชาว์ ชิโนรักษ์ และวรรณ ชิโนรักษ์, 2541) รวมทั้งทำให้โลหะหนักไม่สามารถผ่านไปได้เช่นกัน

2) วิธีซิมพลาสต์ติก (Symplastic pathway) เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านช่องพลาส-โมเดสมาดา (Plasmodesmata) ภายในเซลล์ของพีช เป็นวิธีการที่น้ำสามารถผ่านเข้าสู่ชั้นเนื้อเยื่อ เอนโดเดอริส (Endodermis) เข้าไปได้ซึ่งทำให้โลหะหนักถูกขนส่งจากรากเข้าสู่ทางท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) โดยใช้กลไกในการเคลื่อนที่ของน้ำ 2 แบบ คือ การแพร่แบบไม่ใช้พลังงาน (Passive transport) และการแพร่แบบใช้พลังงาน (Active transport) โดยกลไกการแพร่แบบใช้พลังงานมา จากกระบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์พีช ได้แก่ การลำเลียงผ่านตัวลำเลียงประจุบวก และการแพร่ ผ่านเข้าสู่ช่องที่เป็นประจุบวกสอง (Divalent cation membrane channel) โดยโลหะหนักจะผ่าน เข้าสู่เยื่อหุ้มเซลล์ด้วยกลไกดังกล่าว (Kochain, 1991)

อย่างไรก็ตามภายหลังจากที่แคดเมียมถูกเคลื่อนย้าย (Translocation) เข้าสู่รากพืช และท่อเลียงน้ำ แล้วแคดเมียมจะถูกลำเลียงและเคลื่อนย้ายไปพร้อมกับน้ำสู่ยอดของหญ้าเนเปียร์ แคระ (Upward conduction) โดยอาศัยแรงดึงจากการคายน้ำหรือทรานสไปเรชันพูล (Transpiration pull) และเมื่อหญ้าเนเปียร์แคระเกิดการคายน้ำออกไปแล้ว จะทำให้เซลล์ใบของหญ้าเนเปียร์แคระขาดน้ำ จึงมีแรงดึงออกจากเซลล์ข้างเคียงจนทำให้เกิดการดึงต่อไปเป็นลำดับจากเซลล์ในท่อลำเลียงน้ำของใบ ก้านใบ ลำต้น และราก ตามลำดับ จึงทำให้หญ้าเนเปียร์แคระสามารถลำเลียงน้ำจากรากไปสู่ยอดพืชได้ และแคดเมียมที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับน้ำจึงถูกขนส่งไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืช และเกิดการสะสมขึ้นได้ (Kochain, 1991)



รูปที่ 4.32 กลไกของการดูดดึงสารโลหะหนักด้วยพืช
แบบ Apoplastic pathway และแบบ Symplastic pathway
ที่มา: พันธวิศ สัมพันธ์พานิช (2558)

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบผลของสารคีเลตต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก)

ระยะเวลาในการ เก็บตัวอย่างพืช (วัน)	ปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง)			
	Control	EDTA	NTA	EDTA+NTA
อัตราส่วน 1:0.5 โมล				
1	241.57 ^a ±12.71	276.96 ^b ±12.75	233.53 ^a ±9.01	292.54 ^b ±6.03
15	305.41 ^a ±19.59	406.27 ^b ±17.42	383.06 ^b ±10.20	414.53 ^b ±26.18
30	427.93 ^a ±27.87	522.38 ^c ±36.77	465.71 ^{ab} ±9.95	502.70 ^{bc} ±13.45
45	433.62 ^a ±5.81	503.23 ^c ±15.79	414.65 ^a ±9.30	467.45 ^b ±28.92
60	371.47 ^a ±11.08	440.99 ^b ±27.25	398.51 ^a ±8.60	478.43 ^c ±10.30
75	455.89 ^b ±7.23	419.75 ^{ab} ±37.67	400.14 ^a ±17.81	425.60 ^{ab} ±24.84
90	469.40 ^b ±1.14	455.69 ^b ±22.59	414.38 ^a ±6.87	406.18 ^a ±11.97
105	463.67 ^b ±28.06	447.18 ^{ab} ±20.84	420.03 ^a ±13.81	416.78 ^a ±9.60
อัตราส่วน 1:1 โมล				
1	241.57 ^a ±12.71	349.10 ^c ±31.58	311.11 ^b ±11.76	377.13 ^c ±16.22
15	305.41 ^a ±19.59	489.23 ^b ±42.81	500.86 ^b ±18.62	493.97 ^b ±32.78
30	427.93 ^a ±27.87	889.31 ^c ±52.73	638.98 ^b ±16.24	596.59 ^b ±11.60
45	433.62 ^a ±5.81	632.84 ^c ±44.69	549.97 ^b ±19.82	606.25 ^c ±25.77
60	371.47 ^a ±11.08	607.73 ^c ±38.54	521.72 ^b ±3.17	580.44 ^c ±14.01
75	455.89 ^a ±7.23	575.07 ^c ±32.05	472.39 ^a ±14.15	528.57 ^b ±10.31
90	469.40 ^a ±1.14	559.05 ^b ±25.33	458.53 ^a ±9.25	483.05 ^a ±13.69
105	463.67 ^b ±28.06	567.82 ^c ±21.46	411.81 ^a ±7.89	442.04 ^{ab} ±14.96

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างสารคีเลตที่เติมลงในกรทดลอง โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบผลของสารคีเลตต่อการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้เหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)

ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างพืช (วัน)	ปริมาณแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง)			
	Control	EDTA	NTA	EDTA+NTA
อัตราส่วน 1:0.5 โมล				
1	65.32 ^a ±6.70	88.46 ^b ±10.64	85.17 ^b ±8.36	84.98 ^b ±4.62
15	201.03 ^a ±16.95	228.33 ^b ±10.60	189.40 ^a ±14.80	193.06 ^a ±9.43
30	187.47 ^a ±16.83	246.28 ^b ±24.55	240.39 ^b ±19.47	249.61 ^b ±8.70
45	218.08±19.39	236.16±28.63	229.35±4.86	230.03±9.24
60	173.17 ^a ±17.44	229.66 ^b ±21.07	220.42 ^b ±27.15	222.12 ^b ±10.17
75	196.47 ^a ±8.54	247.39 ^c ±17.71	216.97 ^{ab} ±10.30	236.08 ^{bc} ±9.05
90	184.40±7.05	220.52±21.20	218.68±10.74	213.07±20.56
105	187.39±22.56	191.98±27.55	181.41±16.61	211.47±9.38
อัตราส่วน 1:1 โมล				
1	65.32 ^a ±6.70	122.79 ^b ±12.75	120.73 ^b ±7.74	135.53 ^b ±6.24
15	201.03±16.95	199.80±27.64	194.83±19.22	197.88±13.27
30	187.47 ^a ±16.83	256.97 ^b ±21.86	255.25 ^b ±6.63	263.25 ^b ±4.18
45	218.08 ^a ±19.39	264.50 ^b ±25.86	226.87 ^a ±8.89	231.05 ^a ±7.63
60	173.17 ^a ±17.44	259.05 ^c ±26.25	223.04 ^b ±8.87	220.50 ^b ±10.27
75	196.47 ^a ±8.54	263.88 ^b ±8.74	200.99 ^a ±17.36	217.02 ^a ±14.24
90	184.40 ^a ±7.05	260.45 ^c ±28.21	209.13 ^{ab} ±5.61	219.68 ^b ±12.63
105	187.39±22.56	222.78±11.02	193.69±11.31	198.24±9.42

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างสารคีเลตที่เติมลงในกาทดลอง โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)

4.2.7 ผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ต่อศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระ (Bioconcentration factor; BCF)

1) ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA)

ผลการศึกษา พบว่า ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ที่อัตราส่วน 1:1 โมล ในส่วนได้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระมีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมมากที่สุด เท่ากับ 10.63, 17.85, 43.95, 33.21, 35.72, 38.09, 41.17 และ 47.54 ตามลำดับของระยะเวลาในการทดลอง (ดังรูปที่ 4.32) และมีแนวโน้มลดลงที่ระยะเวลา 45 วัน และเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลา 60, 75, 90 และ 105 วันของการทดลอง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนรากมากกว่าส่วนอื่น ๆ ทำให้ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น สำหรับค่าศักยภาพในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ที่อัตราส่วน 1:1 โมล มีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมมากกว่าชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.74, 7.33, 12.70, 13.90, 15.14, 17.48, 19.18 และ 18.50 ตามลำดับระยะเวลาการทดลอง (ดังรูปที่ 4.33) ซึ่งค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) มีค่าที่สูงในส่วนได้น้ำ (ราก) แสดงให้เห็นว่า การเติมสารอีดีทีเอ (EDTA) มีส่วนช่วยเพิ่มค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และคณะ (2008) ที่ทำการศึกษาคาร์บอนไดรอน (Triton X-100) และสารอีดีทีเอ (EDTA) เพื่อเพิ่มการดูดซับแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 0.3, 1 และ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร พืชที่ใช้ศึกษาคือ ผักบุ้ง (Water spinach) โดยทำการปลูกแบบไร้ดิน (Hydroponics) ผลการศึกษาพบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 10 และ 100 ไมโครโมลต่อลิตรของสารอีดีทีเอ (EDTA) สามารถทำให้ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของผักบุ้ง (BCF) เพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของสารอีดีทีเอที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ค่า BCF ในราก เท่ากับ 0 และ 274 ตามลำดับ สำหรับแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ค่า BCF ในราก เท่ากับ 40 และ 534 ตามลำดับ และแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ค่า BCF ในราก เท่ากับ 96 และ 488 ตามลำดับ

2) ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA)

การศึกษาค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) พบว่า ในส่วนได้น้ำ (ราก) มีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอในอัตราส่วน 1:1 โมล มีค่าเท่ากับ 9.40, 16.82, 25.78, 25.08, 25.58, 24.51, 24.72 และ 22.84 ตามลำดับระยะเวลาในการทดลอง (ดังรูปที่ 4.34) ซึ่ง

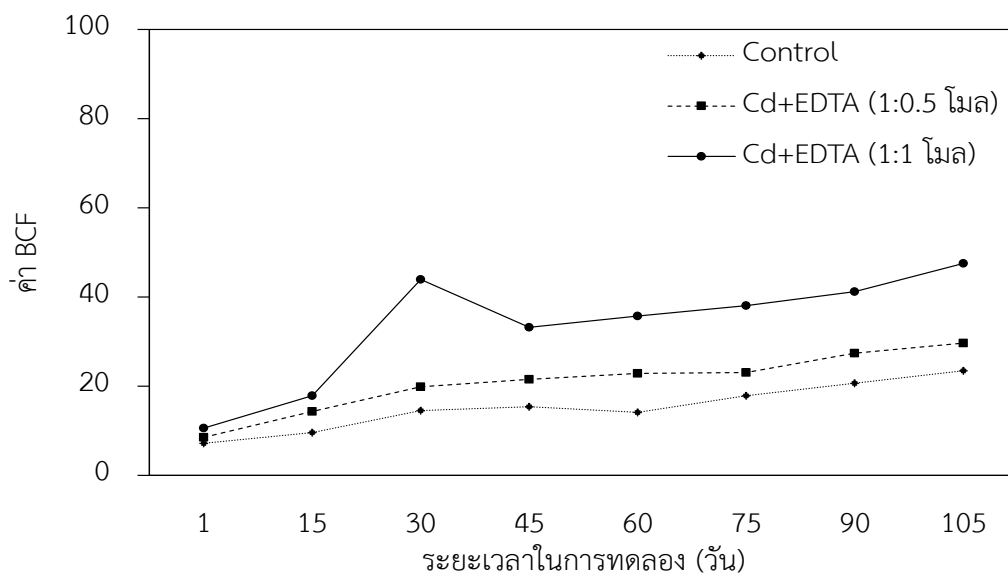
พบว่าชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอมีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคะมากที่สุด คือ 25.58 ที่ระยะเวลา 60 วัน และมีแนวโน้มลดลงในช่วงการทดลองที่ 75, 90 และ 105 วัน ซึ่งค่าศักยภาพที่น้อยลงในส่วนใต้น้ำ (ราก) แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลำเลียงแคดเมียมไปสู่ส่วนลำต้นและใบได้มากขึ้น สำหรับค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคะในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ พบว่า ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) มีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอในอัตราส่วน 1:1 โมล มีค่าเท่ากับ 4.10, 6.97, 10.48, 9.25, 9.63, 10.40, 11.81 และ 12.25 ตามลำดับระยะเวลาในการทดลอง (ดังรูปที่ 4.35) โดยพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ 30 วัน และค่อนข้างคงที่ในช่วงระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น คือ 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน ทั้งนี้ค่าศักยภาพในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) มีปริมาณน้อยกว่าค่าศักยภาพในส่วนใต้น้ำ (ราก) สอดคล้องกับการศึกษาของ Hseu และคณะ (2013) ที่ได้ทำการศึกษากาการดูดดึงแคดเมียมด้วยผักบุ้ง (Water spinach) ร่วมกับสารคีเลต 2 ชนิด คือ สารอีดีดีเอส (EDDS) และเอนทีเอ (NTA) พบว่า การเติมสารเอนทีเอที่ระดับความเข้มข้น 2.5 และ 5.0 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม มีค่า BCF เท่ากับ 14.0 และ 16.4 ซึ่งสารเอนทีเอสามารถช่วยเพิ่มศักยภาพในการสะสมโลหะหนักของพืชได้

3) ค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคะในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอ (EDTA+NTA)

จากผลการศึกษา พบว่า ในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะมีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมมากที่สุด โดยในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอ (EDTA+NTA) ในอัตราส่วน 1:1 โมล มีค่าเท่ากับ 11.41, 17.41, 23.77, 24.27, 25.33, 25.36 25.97 และ 27.28 ตามลำดับระยะเวลาในการทดลอง (ดังรูปที่ 4.36) โดยมีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมมากกว่าชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัด และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากการสะสมที่ส่วนใต้น้ำ (ราก) มากกว่า สำหรับค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคะ ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอ (EDTA+NTA) ในอัตราส่วน 1:1 โมล พบว่า มีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมมากที่สุด เท่ากับ 3.64, 6.54, 10.30, 10.34, 10.95, 10.44, 11.28 และ 10.74 ตามลำดับระยะเวลาในการทดลอง (ดังรูปที่ 4.37) ซึ่งชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอมีค่าค่อนข้างคงที่ ในช่วงระยะเวลาที่ 30-105 วัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 10.30-11.28 รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอ ในอัตราส่วน 1:0.5 โมล ทั้งนี้ทุกชุดการทดลองมีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมในพืชในช่วง 1-30 วัน แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลำเลียงโลหะหนักที่มากขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น

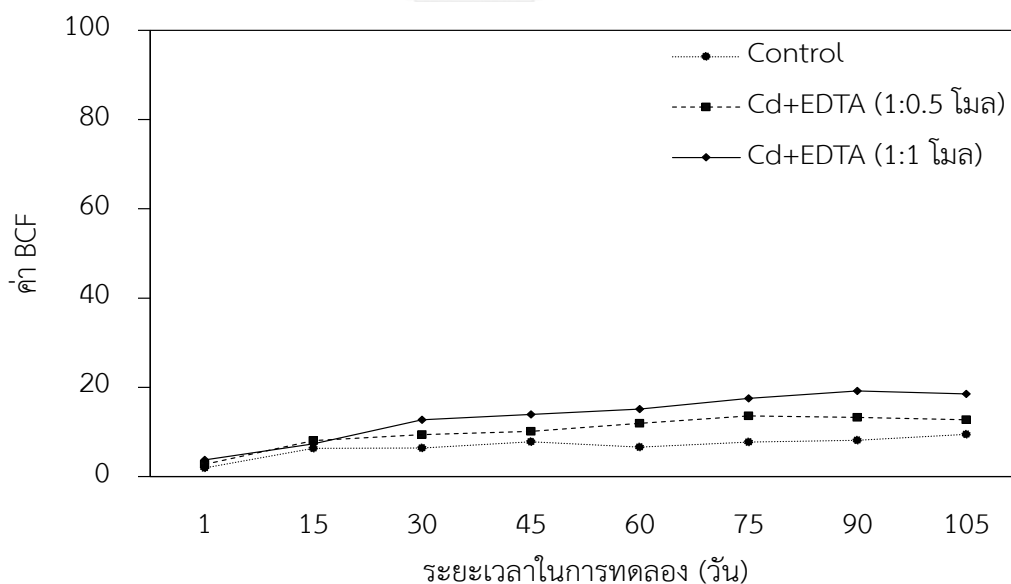
4) การเปรียบเทียบผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ต่อค่าศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าน้ำเนเปียร์แคระ

การศึกษาผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ต่อค่าศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพ (Bioconcentration factor; BCF) ทำการเปรียบเทียบผลของในแต่ละชุดการทดลอง โดยพบว่า ค่าศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าน้ำเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) สำหรับชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอ (EDTA+NTA) พบว่า ค่าศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าน้ำเนเปียร์แคระที่อัตราส่วน 1:0.5 และ 1:1 โมล ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ดังตารางที่ 4.13) และเมื่อพิจารณาถึงค่าศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าน้ำเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลองยังพบว่า ในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าน้ำเนเปียร์แคระมีค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมมากส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ซึ่งมีค่าสูงที่สุดในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอที่ระดับอัตราส่วน 1:1 มีค่าเท่ากับ 10.63, 17.85, 43.95, 33.21, 35.72, 38.09, 41.17 และ 47.54 ตามลำดับระยะเวลาในการทดลอง รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอที่อัตราส่วน 1:1 โมล มีค่าเท่ากับ 9.40, 16.82, 25.78, 25.08, 25.58, 24.51, 24.72 และ 22.84 ตามลำดับระยะเวลาในการทดลอง และชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอที่อัตราส่วน 1:1 โมล มีค่าเท่ากับ 11.41, 17.41, 23.77, 24.27, 25.33, 25.36 25.97 และ 27.28 ตามลำดับระยะเวลาในการทดลอง ทั้งนี้จากการศึกษาค่าเฉลี่ยศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าน้ำเนเปียร์แคระทั้งต้นทั้ง 3 ชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่า การเติมสารอีดีทีเอมีผลต่อการเพิ่มศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าน้ำเนเปียร์แคระได้มากกว่าการเติมสารเอนทีเอ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ McGrath และคณะ (2006) ที่ได้ทำการศึกษารทดลองในภาคสนาม โดยใช้กระบวนการสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) ด้วยการปลูกพืช 2 ชนิด ได้แก่ ต้นอัลไพน์เพนนิเครส (*Thlaspi caerulescens*) และต้นร็อคเครส (*Arabidopsis halleri*) ซึ่งมีการใช้สารคีเลต ได้แก่ สารอีดีทีเอ (EDTA) สารเอนทีเอ (NTA) และกรดซิตริก (CA) ในการดูดดึงแคดเมียมและสังกะสีออกจากดินปนเปื้อนในพื้นที่ของวอเบิร์นมาร์เก็ต การ์เด้น (Woburn Market Garden) ในเมืองเบดฟอร์ดเชอร์ (Bedfordshire) ประเทศอังกฤษ (England) ระหว่างปีพ.ศ. 2541-2543 ผลการศึกษาพบว่า การเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 2.7 มิลลิโมล ทำให้พืชมีความสามารถในการดูดดึงได้ดีกว่าสารเอนทีเอ และกรดซิตริก และยังพบว่า พืชทั้งสองมีความสามารถในการสะสมแคดเมียมและสังกะสีมากกว่า 100 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งนับว่าเป็นพืชที่มีศักยภาพในการสะสมสารมลพิษได้ดี (Hyperaccumulator)



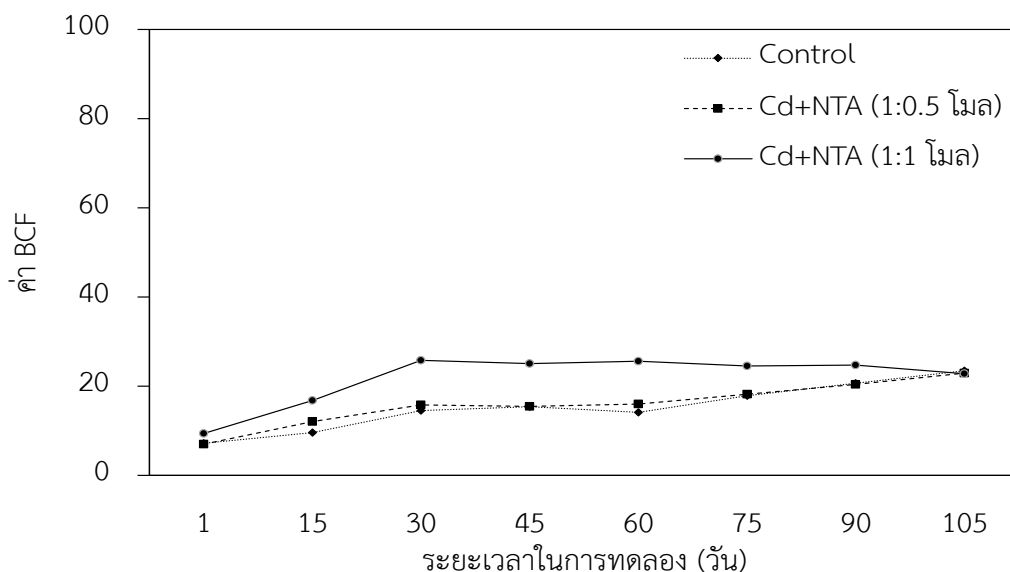
รูปที่ 4.33 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนได้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ
ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)



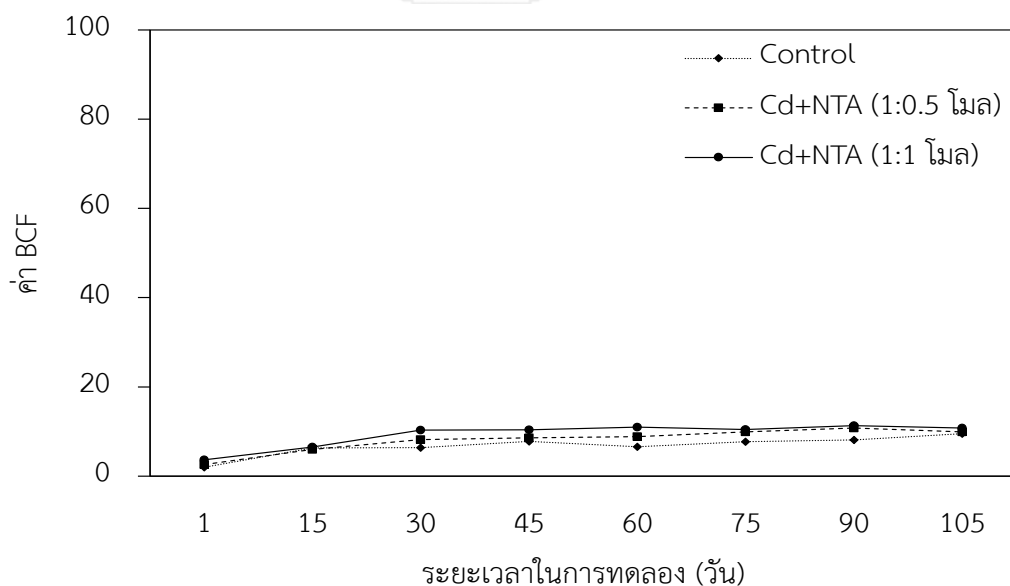
รูปที่ 4.34 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือหน้า (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ
ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)



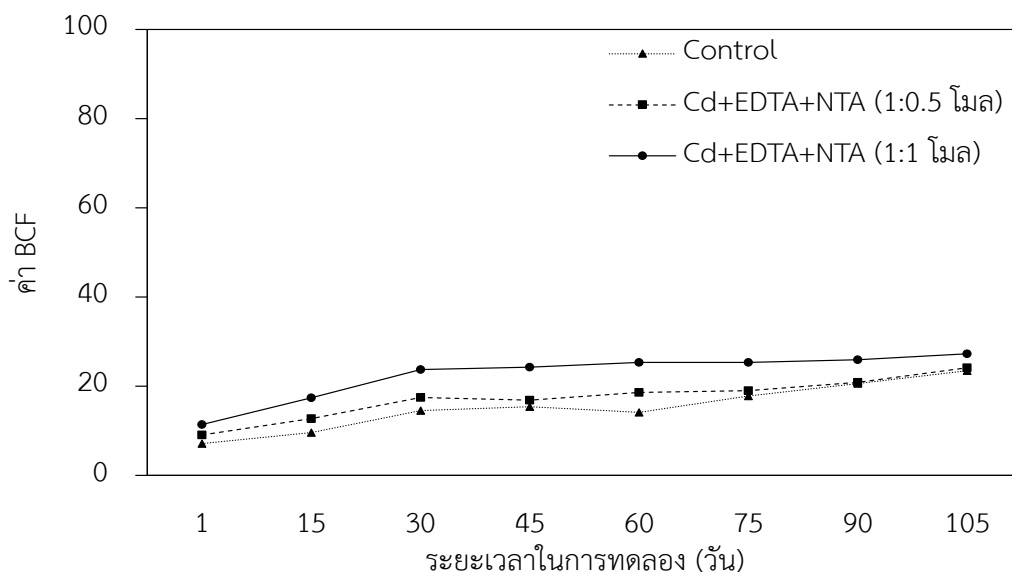
รูปที่ 4.35 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนได้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ
ในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)



รูปที่ 4.36 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือหน้า (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ
ในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) (n=3)

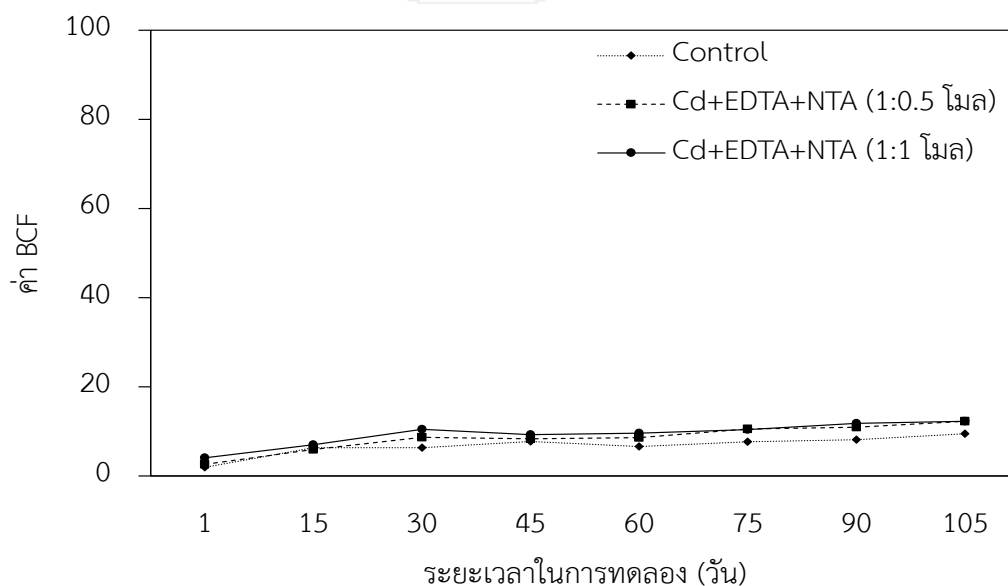
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)



รูปที่ 4.37 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนได้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระ

ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA) (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)



รูปที่ 4.38 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือหน้า (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ

ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ NTA (n=3)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างผลของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)

ตารางที่ 4.13 ศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระเฉลี่ยทั้งต้น

(Bioconcentration factor; BCF)

ระยะเวลา (วัน)	ศักยภาพการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพของหญ้าเนเปียร์แคระเฉลี่ยทั้งต้น (Bioconcentration factor; BCF)			
	Control	EDTA	NTA	EDTA+NTA
อัตราส่วน 1:0.5 โมล				
1	4.56 ^a ±0.59	5.62 ^b ±0.57	4.77 ^a ±0.10	5.85 ^b ±0.34
15	7.96 ^a ±0.61	11.19 ^c ±0.45	9.04 ^b ±0.57	9.33 ^b ±0.48
30	10.46 ^a ±0.88	14.61 ^c ±1.01	11.99 ^b ±0.38	13.09 ^b ±0.78
45	11.60 ^a ±0.35	15.83 ^b ±0.93	11.99 ^a ±0.12	12.59 ^a ±0.34
60	10.36 ^a ±0.30	17.40 ^c ±1.05	12.42 ^b ±0.70	13.62 ^b ±0.53
75	12.77 ^a ±0.14	18.31 ^c ±1.53	14.05 ^{ab} ±0.64	14.78 ^b ±0.95
90	14.38 ^a ±1.00	20.31 ^c ±0.16	15.57 ^b ±0.38	15.91 ^b ±0.41
105	16.47 ^a ±0.60	21.18 ^c ±0.86	16.41 ^a ±0.98	18.22 ^b ±0.91
อัตราส่วน 1:1 โมล				
1	4.56 ^a ±0.59	7.18 ^{bc} ±1.04	6.52 ^b ±0.30	7.76 ^c ±0.10
15	7.96 ^a ±0.61	12.59 ^b ±0.26	11.68 ^b ±0.59	12.19 ^b ±0.52
30	10.46 ^a ±0.88	28.32 ^c ±1.23	18.04 ^b ±0.69	17.13 ^b ±0.88
45	11.60 ^a ±0.35	23.56 ^c ±1.85	17.71 ^b ±0.48	16.76 ^b ±0.53
60	10.36 ^a ±0.30	25.43 ^c ±2.51	18.27 ^b ±1.69	17.48 ^b ±0.27
75	12.77 ^a ±0.14	27.79 ^c ±2.77	17.47 ^b ±0.49	17.88 ^b ±0.61
90	14.38 ^a ±1.00	30.18 ^c ±1.84	18.00 ^b ±0.12	18.89 ^b ±0.50
105	16.47 ^a ±0.60	33.02 ^b ±5.45	16.79 ^a ±0.73	19.77 ^a ±1.70

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างสารคีเลตที่เติมลงในการทดลอง โดยใช้ One Way ANOVA และเปรียบเทียบหาความแตกต่างของผลข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's new multiple range test (DMRT)

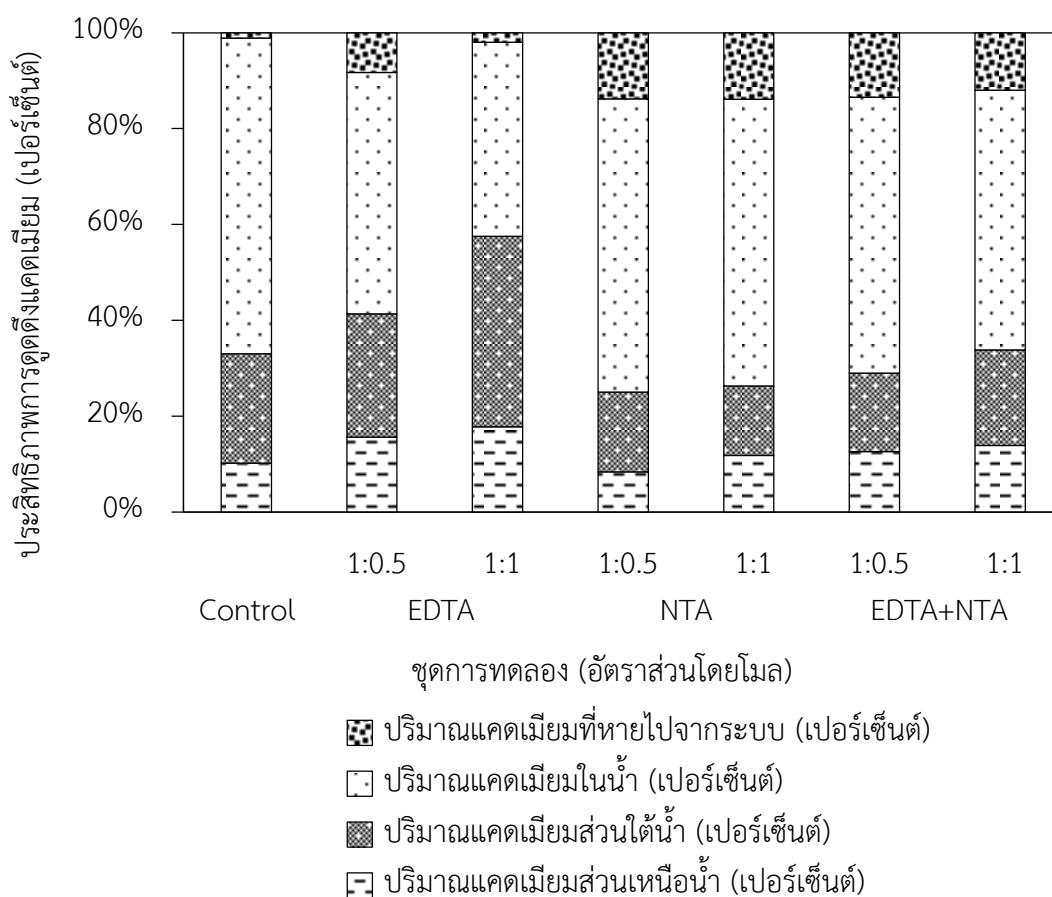
4.2.8 สมดุลมวล (Mass balance) และประสิทธิภาพของสารอีดีทีเอ และสารเอนทีเอต่อการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

การศึกษาสมดุลมวล (Mass balance) เป็นการศึกษาปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในระบบทั้งหมด ด้วยการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในหล้าเนเปียร์แคระซึ่งแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนได้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือหน้า (ลำต้นและใบ) รวมทั้งวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยผลการศึกษาดังกล่าวได้ทำการคำนวณในทุกชุดการทดลองที่ 105 วันของการทดลอง (ดังตารางที่ 4.14) พบว่า ในชุดควบคุมมีปริมาณแคดเมียมสูญหายไป เท่ากับ 1.09 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:0.5 และ 1:1 โมล มีค่าเท่ากับ 8.31 และ 1.94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนในชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ (NTA) ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:0.5 และ 1:1 โมล มีปริมาณแคดเมียมสูญหายไป เท่ากับ 13.79 และ 13.89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอ (EDTA+NTA) ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:0.5 และ 1:1 โมล มีปริมาณแคดเมียมสูญหายไป เท่ากับ 13.46 และ 11.96 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีปริมาณแคดเมียมที่สูญหายไปในระบบทุก ๆ ชุดการทดลอง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแคดเมียมบางส่วนมีการติดอยู่กับภาชนะทดลอง และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และบางส่วนติดอยู่กับหล้าเนเปียร์แคระ ในช่วงทำการเก็บตัวอย่างหล้าเนเปียร์แคระแล้วนำมาล้างก่อนนำไปวิเคราะห์ ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมบางส่วนอาจสูญหายไปจากระบบได้ (ยศวนันท์ หงส์พิริยะกุล, 2553) และเมื่อพิจารณาจากการคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมทั้งหมด (ดังรูปที่ 4.38) พบว่า ในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ที่อัตราส่วนโดย 1:1 โมล มีประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมสูงสุด มีค่าเท่ากับ 57.51 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า การเติมสารอีดีทีเอ (EDTA) สามารถช่วยทำให้หล้าเนเปียร์แคระมีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่าการเติมสารเอนทีเอ (NTA) โดยมีตัวอย่างงานวิจัยที่ทดสอบในผักกาดขาวปลี (*Brassica rapa* L.) ในการดูดซับตะกั่ว และมีการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับด้วยการเติมสารคีเลต พบว่า การเติมสารเอนทีเอ (NTA) มีประสิทธิภาพน้อยกว่าการเติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ด้วยกระบวนการสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) (Luo และคณะ, 2006 อ้างถึงใน Shen และคณะ, 2002)

ตารางที่ 4.14 สมดุลมวลของแคดเมียม (Mass Balance) ในการทดลอง

ชุดการทดลอง	ปริมาณแคดเมียม		ปริมาณแคดเมียมในหยูแอนเปียร์แคระ (มิลลิกรัม)		ปริมาณแคดเมียม (เปอร์เซ็นต์)		ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในระบบ (เปอร์เซ็นต์)	รวมปริมาณแคดเมียม		
	เริ่มต้น (มิลลิกรัม)	ส่วนหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)	ส่วนหนือน้ำ (ราก)	รวมทั้งต้น	ส่วนหนือน้ำ (ลำต้นและใบ)	ส่วนหนือน้ำ (ราก)				
control	36.00	3.66	8.23	11.89	23.72	10.17	22.85	33.01	65.90	98.91
Cd : EDTA 1:0.5	36.00	5.64	9.24	14.88	18.13	15.66	25.68	41.34	50.36	91.69
Cd : EDTA 1:1	36.00	6.41	14.30	20.70	14.60	17.80	39.72	57.51	40.54	98.06
Cd : NTA 1:0.5	36.00	3.02	6.00	9.02	22.02	8.39	16.66	25.05	61.17	86.21
Cd : NTA 1:1	36.00	4.24	5.23	9.47	21.53	11.78	14.53	26.31	59.80	86.11
Cd : EDTA+ NTA 1:0.5	36.00	4.54	5.91	10.45	20.71	12.60	16.42	29.02	57.52	86.54
Cd : EDTA+ NTA 1:1	36.00	5.01	7.17	12.17	19.52	13.91	19.90	33.81	54.23	88.04

และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และคณะ (2004) ที่ได้ทำการศึกษาการใช้หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) ในการดูดดึงตะกั่วออกจากดินที่ระดับความเข้มข้นที่ศึกษา เท่ากับ 0, 500, 2,500 และ 5,000 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม และมีการเติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 0, 0.5, 2.5 และ 5.0 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ทำการเก็บตัวอย่างที่ 15 วัน ผลการศึกษาพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของสารอีดีทีเอที่ 5.0 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม หญ้าแฝกมีความสามารถในการสะสมแคดเมียมเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะการเติมสารอีดีทีเอ โดยมีการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) เท่ากับ 15.6, 266, 951 และ 2,280 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือ น้ำ (ลำต้นและใบ) เท่ากับ 3.59, 45.2, 160 และ 243 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ



รูปที่ 4.39 ประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระในแต่ละชุดการทดลอง

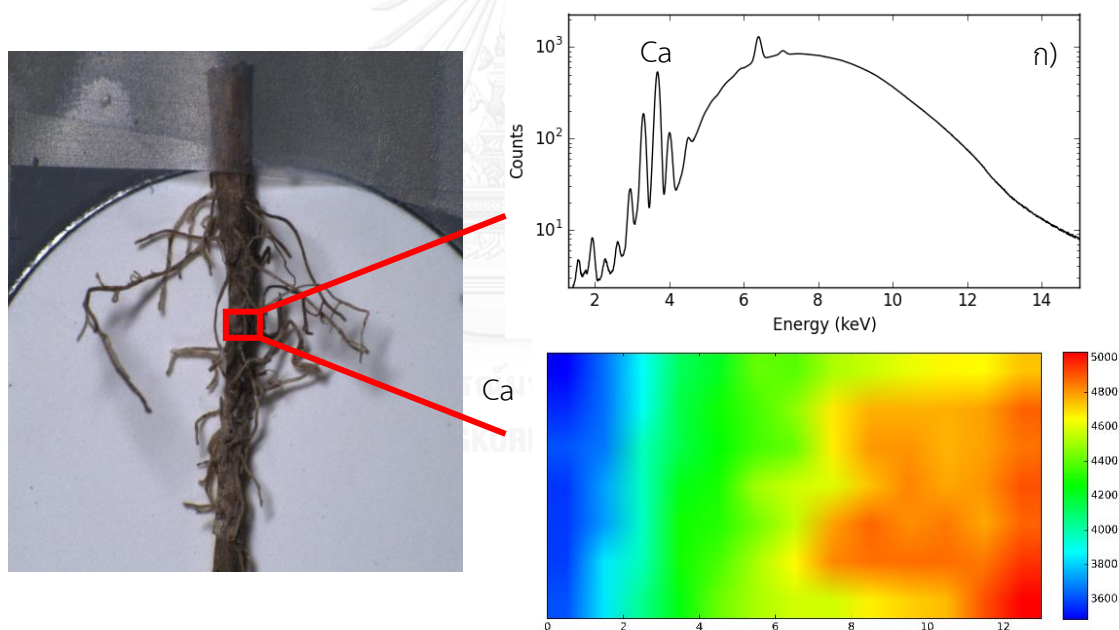
4.2.9 ผลของการตรวจวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระ

การวิเคราะห์การเคลื่อนย้ายแคดเมียมไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืชด้วยระบบการคายลำแสงซินโครตรอน (Synchrotron) ซึ่งเป็นการศึกษาการกระจายตัว การส่งผ่าน และการสะสมแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของพืชโดยใช้ระบบลำแสงที่ 6 (BL6b) (สถาบันแสงวิจัยซินโครตรอน, 2559) ด้วยเทคนิค Micro-XRF/XRD โดยใช้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์ครอบคลุมตั้งแต่พลังงาน 2-10 keV จากแม่เหล็กสองขั้วหมายเลข 6 ของวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาด 1.2 GeV ทำการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมและตรวจวัดการสะสมของแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ด้วยโครงสร้างการเรืองแสงด้วยรังสีเอกซ์จากแสงซินโครตรอน (Synchrotron) โดยมีหลักการทำงาน คือ กระจกเงารังสีเอกซ์จะอาศัยหลักการของ Bragg เมื่อรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยวตกกระทบผลึกหรือโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมอย่างมีระเบียบ จะเกิดการสะท้อนบนระนาบของผลึก และเมื่อผลต่างของระยะทางเดินของรังสีเอกซ์มีค่าเท่ากับจำนวนเท่า (n) ของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (λ) จะทำให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนของห้วงที่ซึ่งรูปแบบดังกล่าวเรียกว่า Diffraction pattern ดังนั้นเมื่อทราบความยาวคลื่น และวัดมุมที่เกิดการเลี้ยวเบน (θ) ก็สามารถคำนวณหาค่าระยะระหว่างระนาบของผลึกได้ (d) โดยปรากฏการณ์การเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence) เกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนชั้นในของอะตอมถูกกระตุ้นให้หลุดออกมา และเกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนในชั้นถัดมา ทำให้เกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ โดยที่รังสีเอกซ์ที่คลายออกมานั้นจะมีคุณลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละธาตุ ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการหาองค์ประกอบทางอะตอมของสารตัวอย่างได้

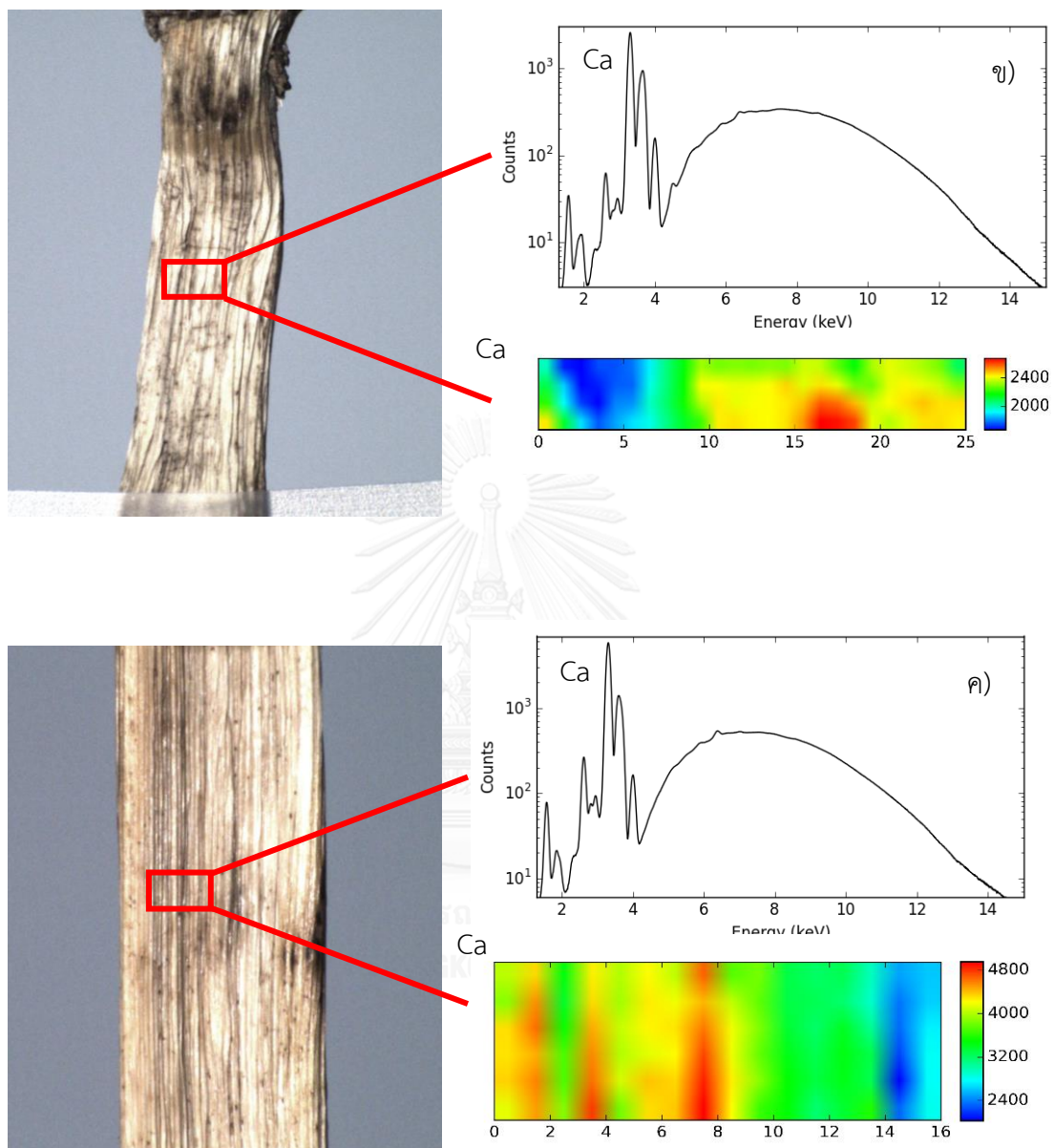
ผลจากการตรวจวิเคราะห์การเคลื่อนที่แคดเมียมในชุดการทดลองที่มีการเติมสาร EDTA ในอัตราส่วน 1:1 โมล ซึ่งเป็นชุดการทดลองที่มีปริมาณการสะสมแคดเมียมสูงที่สุดเมื่อเทียบกับชุดการทดลองอื่นๆ ซึ่งผลดังกล่าวได้นำมาศึกษาการสะสมแคดเมียม โดยการวิเคราะห์ใช้ระบบลำแสงที่ 6 (BL6b) ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (Micro-XRF/XRD) ซึ่งเป็นการตรวจวัดการสะสมและการกระจายตัวของแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ทั้งนี้การสะสมแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ทั้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ระบบลำแสงที่ 6 (BL6b) หรือลำแสงซินโครตรอนนั้นไม่สามารถวัดการสะสมของแคดเมียมได้ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่างๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระมีปริมาณความเข้มข้นต่ำ หากแต่สามารถตรวจพบการเคลื่อนที่ และสะสมของธาตุอื่น ๆ ในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ได้แก่ อาร์กอน (Ar) แคลเซียม (Ca) คลอรีน (Cl) และโพแทสเซียม (K) (ดังรูปที่ 4.39) ซึ่งธาตุที่พบมีปริมาณความเข้มข้นที่สูงกว่าแคดเมียม นอกจากนี้ยังพบว่า แคลเซียมมีการสะสมมากที่สุดในส่วนของลำต้น รองลงมาคือ ส่วนใบ และส่วนราก ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามปริมาณการสะสมแคลเซียมที่ต่ำแสดงด้วยสีน้ำเงิน และปริมาณการสะสมแคลเซียมที่สูงแสดงด้วยสีแดง (Limit of detection = 150-200 ppm) ซึ่งการตรวจวิเคราะห์ในครั้งนี้นี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของกัลย์สุตา ปิ่นพา (2557) ได้ทำการศึกษาผลของสารคีเลต และค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่อการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตะกอนท้องน้ำด้วยผักตบชวา โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ 1) ชุดควบคุมที่มีดินปนเปื้อน และมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ระดับ 4, 5, 7 และ 9 และ 2) ชุดการทดลองที่ดินปนเปื้อนและเติมสารคีเลตและมีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ (1) ชุดดินปนเปื้อนที่มีการเติม EDTA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ระดับ 4, 5, 7 และ 9 (2) ชุดดินปนเปื้อนที่มีการเติม DTPA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ระดับ 4, 5, 7 และ 9 และ (3) ชุดดินปนเปื้อนที่มีการเติม EDTA และ DTPA ที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ระดับ 4, 5, 7 และ 9 แล้วทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 เดือน เพื่อวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของผักตบชวา ผลการศึกษาพบว่า ชุดการทดลองที่เติมสาร DTPA ที่ระดับค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5 พบการสะสมแคดเมียมมากที่สุดในส่วนใต้น้ำเท่ากับ 61.17 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งพืช ในส่วนเหนือน้ำพบแคดเมียมเท่ากับ 10.20 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งพืช ที่เวลา 30 วัน และได้ทำการศึกษาการสะสมแคดเมียม โดยการวิเคราะห์ใช้ระบบลำเลียงแสงที่ 6 (BL6b) ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีเอกซ์ (Micro-XRF/XRD) จากผลการวิเคราะห์ไม่สามารถตรวจวัดการสะสมแคดเมียมได้ทั้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของผักตบชวามีปริมาณความเข้มข้นที่ต่ำเกินไป ซึ่งเป็นข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือวิเคราะห์ นอกจากนี้ จากการศึกษาการวิเคราะห์ใช้ระบบลำเลียงแสงที่ 6 (BL6b) ของ Nanthavong (2012) ได้ทำการศึกษาผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และเอนทีเอ (NTA) ต่อการดูดดึงสารหนู ในราก ลำต้น และใบของต้นไมยราบ (*Mimosa pudica* L.) การศึกษาเบื้องต้นได้ทำการทดสอบความเป็นพิษของสารหนูที่มีต่อต้นไมยราบ โดยการเติมสารไดโซเดียมไฮโดรเจนอาซิเนท ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 5, 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200, 300 และ 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และทดสอบ NTA และ EDTA ที่ระดับความเข้มข้น เท่ากับ 50, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน จากนั้นจึงปลูกต้นไมยราบเป็นระยะเวลา 1 เดือน ผลการศึกษาเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่า ต้นไมยราบสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีความเข้มข้นของสารหนูน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ในขณะที่ความเข้มข้นอื่น ๆ แสดงความเป็นพิษต่อพืช เช่น ใบและลำต้นแห้ง หรือหงิกงอ ส่วน NTA และ EDTA ไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช สำหรับการทดลองหลักได้เติมสารหนูที่ระดับความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 3 เดือน หลังจากนั้นจึงปลูกต้นไมยราบ 1 ต้นต่อ 1 กระถาง และเติม NTA และ EDTA แยกกันที่ความเข้มข้น 3 ระดับดังกล่าว

ทำการเก็บตัวอย่างดิน และพืชทุก ๆ 30 วัน เป็นระยะเวลา 120 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารหนู ผลการศึกษา พบว่า สารหนูสะสมอยู่ในรากมีความเข้มข้นสูงกว่าอยู่ในลำต้นและใบ ซึ่งความเข้มข้นสูงสุดอยู่ที่ระยะเวลา 120 วัน พบว่า ในรากมีค่าเท่ากับ 29.71 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกิโลกรัมพืช ส่วนในลำต้นและใบมีค่าเท่ากับ 6.32 มิลลิกรัมของสารหนูต่อกิโลกรัมพืช และพบว่า มีการสะสมมากที่สุดในช่วงการทดลองที่เติม EDTA 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน ซึ่งในการเก็บเกี่ยวที่ระยะเวลาและความเข้มข้นเดียวกันของสารเร่ง พบว่าสาร EDTA มีความสามารถในการเร่งการดูดซับสารหนูเข้าสู่ต้นไมยราบได้ดีกว่า NTA นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Synchrotron μ -X-ray fluorescence spectroscopy (Beamline 6b) ไม่สามารถตรวจพบรูปแบบการแพร่กระจายของสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของต้นไมยราบที่ระดับความเข้มข้นดังกล่าวได้ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ และความเข้มข้นของสารหนูในตัวอย่างที่น้อยเกินไป



รูปที่ 4.39 การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ด้วยระบบลำเลียงแสง BL6b: Micro-XRF
ก) ในส่วนราก ข) ในส่วนลำต้น และ ค) ในส่วนใบ ของหญ้าน้ำเป็ยร์แคระ



รูปที่ 4.39 การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ด้วยระบบลำเลียงแสง BL6b: Micro-XRF
 ก) ในส่วนราก ข) ในส่วนลำต้น และ ค) ในส่วนใบ ของหญ้าเนเปียร์แคระ (ต่อ)

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลของสาร EDTA และสาร NTA ต่อการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 คือ การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม และส่วนที่ 2 คือ การศึกษาผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ต่อการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างที่ 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 และ 105 วัน จากผลการทดลองทุกชุดการทดลองสามารถกล่าวโดยสรุป ได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาถึงผลการศึกษาหญ้าเนเปียร์แคระในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้น 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่หญ้าเนเปียร์แคระสามารถเจริญเติบโตได้ คือ ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในช่วง 0 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยหญ้าเนเปียร์แคระมีอัตราการเติบโตที่เพิ่มขึ้น และมีการแสดงอาการความเป็นพิษน้อยอยู่ในช่วง 0.00-5.72 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษเท่ากับ 0.00, 3.40, 4.72, 3.24 และ 5.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 0-30 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 30 วัน ประสิทธิภาพของการดูดซับแคดเมียมมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 64.36, 63.33, 36.40 และ 24.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่ 0-30 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการศึกษ ปริมาณการสะสมแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์นั้นมีแนวโน้มของการดูดซับแคดเมียมเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ส่วนปริมาณการสะสมโลหะหนักในหญ้าเนเปียร์แคระมีปริมาณการสะสมแคดเมียมไว้ในส่วนใต้น้ำ (ราก) มากกว่าส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) และเมื่อทำการพิจารณาปริมาณการสะสมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า มีปริมาณการสะสมแคดเมียมไว้ในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) และในส่วนใต้น้ำ (ราก) มีค่าเท่ากับ 200.00 และ 453.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และเมื่อทำการพิจารณาถึงค่าศักยภาพในการสะสมแคดเมียมทางชีวภาพ (Bioconcentration factor; BCF) ของหญ้าเนเปียร์แคระที่ปลูกในน้ำเสียสังเคราะห์นั้น พบว่า มีค่าที่ลดลงในระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในช่วง 40 ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้

เห็นว่า ที่ระดับความเข้มข้นที่ 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระดับความเข้มข้นที่สูงไม่เหมาะสมต่อการเติบโตของหญ้าเนเปียร์แคระ

5.1.2 การศึกษาผลของสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ต่อการดูดดึงแคลเซียม

1) ความสามารถของสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ในการดูดดึงแคลเซียมของหญ้าเนเปียร์แคระ

เมื่อทำการพิจารณาปริมาณสะสมแคลเซียมในหญ้าเนเปียร์แคระในทุกชุดการทดลองที่เติมสารคีเลต พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีความสามารถในการดูดดึงแคลเซียมเพิ่มขึ้น โดยมีปริมาณการสะสมแคลเซียมในหญ้าเนเปียร์แคระในส่วนใต้น้ำ (ราก) มากกว่าส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ซึ่งชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอเป็นชุดที่ช่วยในการดูดดึงแคลเซียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีที่สุดในทุกช่วงระยะเวลาของการทดลอง และสามารถดูดดึงแคลเซียมได้มากที่สุดที่อัตราโดยโมล 1:1 โมล และมีปริมาณการสะสมสูงสุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) ที่ 30 วัน เท่ากับ 889.31 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง เมื่อเทียบกับชุดควบคุม ชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ และชุดที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอ สำหรับชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอ พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีความสามารถในการดูดดึงแคลเซียมได้มากที่สุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 โดยมีค่ามากที่สุดที่เวลา 30 วัน มีค่าเท่ากับ 638.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และมีปริมาณการสะสมแคลเซียมได้น้อยเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น และชุดที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอ พบว่า หญ้าเนเปียร์แคระมีความสามารถในการดูดดึงแคลเซียมได้น้อยลงเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น ในช่วง 60-105 วัน โดยมีการสะสมแคลเซียมมากสุดในส่วนใต้น้ำ (ราก) ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 มีค่าเท่ากับ 606.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง สำหรับการศึกษาในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอไม่มีผลทำให้ความสามารถในการดูดดึงแคลเซียมทั้งหมดของหญ้าเนเปียร์แคระเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการเติมสารอีดีทีเอเพียงชนิดเดียว นอกจากนี้ในทุกชุดการทดลองมีการสะสมปริมาณแคลเซียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) มากกว่าในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้นและใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระ

2) ประสิทธิภาพของสารอีดีทีเอ (EDTA) และสารเอนทีเอ (NTA) ต่อการดูดดึงแคลเซียมในหญ้าเนเปียร์แคระ

การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดดึงแคลเซียมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ ในชุดการทดลองที่ทำการเติมสารอีดีทีเอ ที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 พบว่า มีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคลเซียมในหญ้าเนเปียร์แคระได้สูงสุด มีค่าเท่ากับ 57.51 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา ได้แก่ ชุดการทดลองที่ทำการเติมสารอีดีทีเอที่อัตราส่วนโดยโมล 1:0.5 > ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอที่อัตราส่วนโดยโมล 1:0.5 > ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอร่วมกับสารเอนทีเอที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1

> ชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอที่อัตราส่วนโดยโมล 1:1 > ชุดการทดลองที่เติมสารเอนทีเอที่อัตราส่วนโดยโมล 1:0.5 โดยมีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ เท่ากับ 41.34 > 33.81 > 29.02 > 26.31 > 25.05 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับของชุดทดลอง ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า หญ้าเนเปียร์แคระเป็นพืชที่มีความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีและหากมีการเติมสารอีดีทีเอที่ระดับอัตราส่วนโดยโมล 1:1 จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการศึกษาการใช้หญ้าเนเปียร์แคระทั้งในการบำบัดดิน ดินตะกอนท้องน้ำ และน้ำที่ปนเปื้อนในพื้นที่จริง เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ เช่น แสงแดด อุณหภูมิ และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ต่อการเจริญเติบโต การดูดซับแคดเมียม และการแสดงความเป็นพิษของหญ้าเนเปียร์แคระ

2) ควรศึกษาองค์ประกอบทางเคมีในหญ้าเนเปียร์แคระ เพื่อศึกษาผลของการดูดซับและการสะสมโลหะหนักในพืช

3) ควรมีการศึกษาการใช้สารคีเลตชนิดอื่น เพื่อเปรียบเทียบความสามารถ และประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งอาจให้ผลที่ดีหรือมีความเหมาะสมกว่าสารอีดีทีเอ (EDTA) และเอนทีเอ NTA เช่น กรดซิตริก (Citric acid; CA) กรดฟีนอลิก (Phenolic acid; FA) กรดมาลิก (Malic acid; MA) สารอีดีทีเอส EDDS (Ethylene diamine disuccinate) สารอีจีทีเอซ (Ethylene glycol tetraacetic acid; EGTA) สารดีทีพีเอ (Diethylene triamino pentaacetic acid; DTPA) และสารเอชอีดีทีเอ (Hydroxylethylene tetraacetic acid; HEDTA) เป็นต้น

4) ควรมีการศึกษาต่อในขั้นตอนการนำหญ้าเนเปียร์แคระมาเข้ากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas) โดยพิสูจน์ให้ทราบว่า มีการพบปริมาณแคดเมียมภายหลังจากผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพหรือไม่

5) ควรมีการศึกษากระบวนการกำจัดที่ถูกต้อง เช่น การนำหญ้าเนเปียร์แคระไปเผาที่อุณหภูมิที่ทำให้แคดเมียมไม่ระเหย และนำส่วนเถ้า (Ash) ของหญ้าเนเปียร์แคระไปทำการปรับเสถียร (Stabilization) เพื่อลดความเป็นพิษ และทำให้เป็นของแข็ง (Solidification) โดยผสมกับปูนซีเมนต์ เพื่อห่อหุ้มกากของเสียป้องกันการชะล้าง หลังจากนั้นจึงนำมาฝังกลบในหลุมฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure landfill) เป็นต้น

6) การวิเคราะห์การเคลื่อนย้ายธาตุแคดเมียมไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืชด้วยแสงซินโครตรอน (Synchrotron) โดยใช้ระบบลำเลียงแสงที่ 6 (BL6b) ด้วยเทคนิค Micro-XRF/XRD เพื่อดูการกระจายตัวของธาตุแคดเมียม ไม่สามารถตรวจพบการกระจายตัวของธาตุแคดเมียมได้ เนื่องจากการวิเคราะห์ธาตุที่ต้องการในตัวอย่างพืชจำเป็นต้องใช้ความเข้มข้นที่มีปริมาณการสะสมอยู่สูง ดังนั้นจึงควรมีการเลือกใช้ระบบลำเลียงแสงอื่นที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อตรวจวิเคราะห์และสามารถหาชนิดและองค์ประกอบของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ได้ และสามารถแสดงผลของข้อมูลได้อย่างถูกต้องและชัดเจน



รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กานดา นาคมณี, จีระวัชร เข็มสวัสดิ์, ทิพา บุญยะวิโรจ และวีระพล พูนพิพัฒน์. 2538. อิทธิพลของการตัดที่มีผลต่อผลผลิต และส่วนประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์ 3 สายพันธุ์ ภายใต้ระบบชลประทาน. รายงานผลงานวิจัยประจำปี 2538. กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 122-128.

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2521. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2521 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคน้ำ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.cadmium.org>. [25 มีนาคม 2559]

กรมควบคุมมลพิษ. 2541. แคดเมียม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: อินทิเกรตเต็ดโปรโมชันเทคโนโลยี.

กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่. 2549. การปนเปื้อนแคดเมียมในดิน รายงานการศึกษาวิจัยสาเหตุการปนเปื้อนแคดเมียมในดินพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. กรุงเทพมหานคร.

กัลปพฤกษ์ คงเมือง. 2553. ผลของอัตราปุ๋ยและกรดซัลฟิวริกต่อการดูดซับแคดเมียมในน้ำด้วยผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กัลย์สุตา ปิ่นพา. 2557. ผลของสารคีเลตและพีเอชต่อการกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินตะกอนท้องน้ำด้วยผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จารุวรรณ วงศ์เนศ. 2549. การใช้พืชบำบัดสารตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

ชินอรส ศรีศิริ, นักรบ กลัดกลีบ และภัทรสุตา วงศ์จักร. 2556. การประเมินศักยภาพพืชพลังงาน 7 สายพันธุ์เพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ: วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

ณัฐกาญจน์ ตันดิธีระศักดิ์. 2553. ผลของอัตราปุ๋ยและกรดซัลฟิวริกต่อการดูดซับแคดเมียมและสังกะสีของอ้อยที่ปลูกในดินปนเปื้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ดิเรก ทองอร่าม. 2550. การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน: หลักการจัดการผลิตและเทคโนโลยีการผลิตเชิงธุรกิจในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: บริษัทพิมพ์ดีการพิมพ์.

- ทิพวรรณ พจนานารถ. 2552. ผลของอีดีทีเอและอีดีดีเอสต่อการดูดตั้งโครเมียมและตะกั่วโดยใช้
สับปะรดที่ปลูกในดินปนเปื้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์
สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิลวรรณ ไชยทนต์, ร่มไทร มุกเมืองทอง, วรุฒ ชมเจริญ และอนุพันธ์ วรรณภริระ. 2559. ศักยภาพการ
ผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระภายใต้การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายต่าง.
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. ฉบับที่1 ปีที่1. มกราคม-
มิถุนายน, 32-36.
- ประณต มณีอินทร์, ปิติพงษ์ โตบันลือภพ, นพ ตันมุกขกุล, สุขุมาลัย เลิศมงคล และจักรพงษ์ ไชยวงศ์
2558. ผลของระยะเวลาตัดหญ้าเนเปียร์ ต่อผลผลิต องค์ประกอบทางเคมีและผลิตภาพก๊าซ
ชีวภาพ. เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53:
สาขาพืช, สาขาสัตว, สาขาสัตวแพทยศาสตร์, สาขาประมง, สาขาส่งเสริมการเกษตร และ
คหกรรมศาสตร์, กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 3-6 กุมภาพันธ์ 2558, 703-
710.
- พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2558. การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืช. 1,000 เล่ม, พิมพ์ครั้งที่ 1.
กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ยศนันท์ หงส์พิริยะกุล. 2553. การกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินและน้ำโดยใช้บอนเขียว บริเวณห้วย
คลิตี้จังหวัดกาญจนบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์
สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรารณ ศรีตัมภวา. 2550. การดูดตั้งแคดเมียมโดยอ้อยที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- วิรัช สุขสราน, ชิต ยุทธวรวิทย์ และพุลศรี ศุภระรุจิ. 2539. อิทธิพลของระยะปลูกที่มีต่อผลผลิตและส
วนประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์ 3 สายพันธุ์ในพื้นที่จังหวัดเพชรบุรี, ในรายงานประจำปี
2539. กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 183-
197.
- วีระศักดิ์ จิโนแสง, ประเสริฐศักดิ์ นันทชมชื่น และวิรัช สุขสราน. 2542. ผลผลิตและส่วนประกอบ
ทางเคมีของหญ้าเนเปียร์ในพื้นที่ที่ต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์ 3 สายพันธุ์ ในพื้นที่จังหวัด
เพชรบูรณ์. ในรายงานประจำปี 2542. กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ กรุงเทพมหานคร:
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 26-41.
- ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ. 2549. การใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอน
1,000 เล่ม, พิมพ์ครั้งที่ 1. นครราชสีมา: สมบูรณ์การพิมพ์.

- ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2545. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. 1,000 เล่ม, พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สายัณห์ ทัดศรี. 2548. ภัยอาหารสัตว์และหญ้าพื้นเมืองในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน. 2559. แสงซินโครตรอน BL6b: Micro-XRF. [ออนไลน์]. กรุงเทพมหานคร. แหล่งที่มา: <http://www.slri.or.th>. [2 กรกฎาคม 2559]
- สรัดนา เสนาะ. 2548. การดูดซับธาตุโลหะหนักของหญ้าแฝก ทานตะวัน และข้าว ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุธินี วดีศิริศักดิ์. 2550. การกำจัดโครเมียมด้วยต้นก้างปลาโดยวิธีการปลูกพืชในดินและไร้ดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุภาพร แป้งทา. 2552. การใช้สับปะรดเป็นตัวชี้วัดความเป็นพิษของโครเมียมและตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมพล ไวปัญญา, เสน่ห์ กุลนะ, อิศระ สุริยะชัยวัฒน์ และเฉลียว ศรีชู. 2546. อิทธิพลของระยะปลูกที่มีต่อผลผลิตและสวนประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์ 3 สายพันธุ์ในพื้นที่จังหวัดนครพนม, รายงานประจำปี 2546. กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ กรุงเทพมหานคร: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 32-42
- สุรภี โรจน์อารยานนท์. 2532. มลพิษสภาวะแวดล้อมของเรา. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุริยะ สมศิริ และสุภาวัฒน์ วิวรรณภัทรกิจ. 2558. ศักยภาพการแปรรูปหญ้าเนเปียร์ไปเป็นพลังงาน. วารสารวิจัยพลังงาน สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ฉบับที่ 2 ปีที่ 12. กรกฎาคม-ธันวาคม 2558, 47-58
- อานัฐ ตันโซ. 2548. การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: บริษัททรีโอ แอดเวอร์ไทซิ่ง แอนด์ มีเดีย จำกัด.

ภาษาอังกฤษ

- Abhilash, P. C., Pandey, V. C., Srivastava, P., Rakesh, P. S., Chandran, S., Singh, N., and Thomas, A. P. 2009. Phytofiltration of cadmium from water by *Limnocharis*

- flava* (L.) Buchenau grown in free-floating culture system. *Journal of hazardous materials*, 170(2), 791-797
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 1999. Toxicological Profile for Cadmium. [Online]. Available from: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp5.pdf> [2016, November 15]
- Alloway, B. 1995. Cadmium. *In: Alloways BJ (ed) Heavy Metals in Soils*. (2 ed.), pp. 122-151. Blackie Academic and Professional: London.
- Brown, J., Jolley, D., and Lytle, C. M. 1991. Comparative evaluation of iron solubilizing substances (phytosiderophores) released by oats and corn: iron-efficient and iron-inefficient plants. *In Iron Nutrition and Interactions in Plants*, pp. 189-195. Springer Netherlands.
- Brunken, J.N. 1997. A Systematic study of Pennisetum Sect. *Pennisetu* (Gramineae). *American Journal of Botany*. 64:161-176.
- Bucheli-Witschel, M., and Egli, T. 2001. Environmental fate and microbial degradation of aminopolycarboxylic acids. *FEMS microbiology reviews*, 25(1), 69-106.
- Chaengcharoen, W. 2007. *Comparison of heavy metals removal from contaminated soil by siam weed (Chromolaena odorata) and vetiver grass*. Environmental Management, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Chayapan, P., Kruatrachue, M., Meetam, M., and Pokethitiyook, P. 2015. Phytoremediation potential of Cd and Zn by wetland plants, *Colocasia esculenta* L. Schott., *Cyperus malaccensis* Lam., and *Typha angustifolia* L. grown in hydroponics. *Journal of Environmental Biology*, 36(5), 1179.
- Chen, Y., Shen, Z., and Li, X. 2004. The use of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals. *Applied Geochemistry*, 19(10), 1553-1565.
- Das, S., Goswami, S., and Talukdar, A. D. 2014. A study on cadmium phytoremediation potential of water lettuce, *Pistia stratiotes* L. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 92(2), 169-174.
- Domy, C. A. 2001. *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals* (2 ed.). New York: Springer.

- Ensley, M. D., Carland, J. W., and Carland, J. C. 2000. Investigating the existence of the lead entrepreneur. *Journal of small business management*, 38(4), 59-77.
- Evangelou, M. W., Bauer, U., Ebel, M., and Schaeffer, A. 2007. The influence of EDDS and EDTA on the uptake of heavy metals of Cd and Cu from soil with tobacco *Nicotiana tabacum*. *Chemosphere*, 68(2), 345-353.
- Geebelen, W., Vangronsveld, J., Adriano, D. C., Van Poucke, L. C., and Clijsters, H. 2002. Effects of Pb-EDTA and EDTA on oxidative stress reactions and mineral uptake in *Phaseolus vulgaris*. *Physiologia plantarum*, 115(3), 377-384.
- Grčman, H., Vodnik, D., Velikonja-Bolta, Š., and Leštan, D. 2003. Ethylenediaminedisuccinate as a new chelate for environmentally safe enhanced lead phytoextraction. *Journal of Environmental Quality*, 32(2), 500-506.
- Guo, D., Jia, X., Wang, X., and Zhu, W. 2011. *The enhancement effects of EDTA, citric acid and NTA on phytoremediation of vermicompost enriched with high Cu and Zn contents*. Paper presented at the Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE), 2011 International Conference on pp. 2684-2687. IEEE.
- Hasegawa, I. 2002. Phytoremediation; a novel strategy for the removal of toxic heavy-metals from the contaminated soils using plants. *Research Journal of Food and Agriculture (Japan)*, 36(6), 10-15.
- Hernández-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.
- Hoffmann, W. A., and Poorter, H. 2002. Avoiding bias in calculations of relative growth rate. *Annals of Botany*, 90(1), 37-42.
- HSDB. 2009. Hazardous Substances Data Bank. National Library of medicine. HSDB and search on CAS number. [Online]. Available from: <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/htmlgen?>. [2016, May 20]
- Hseu, Z.-Y., Jien, S.-H., Wang, S.-H., and Deng, H.-W. 2013. Using EDDS and NTA for enhanced phytoextraction of Cd by water spinach. *Journal of environmental management*, 117, 58-64.

- Hu, M., Ao, Y., Yang, X., and Li, T. 2008. Treating eutrophic water for nutrient reduction using an aquatic macrophyte (*Ipomoea aquatica* Forsskal) in a deep flow technique system. *Agricultural water management*, 95(5), 607-615.
- Jamal, S., Iqbal, M., and Athar, M. 2006. Phytotoxic effect of aluminum and chromium on the germination and early growth of wheat (*Triticum aestivum*) varieties Anmol and Kiran. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 3(4), 411-416.
- James, M. B. 1999. The Element Cadmium. [Online]. Available from: http://www.jimesm.brown.co.uk/cd_pigment/cadmium.html. [2016, June 20]
- January, M. C., Cutright, T. J., Van Keulen, H., and Wei, R. 2008. Hydroponic phytoremediation of Cd, Cr, Ni, As, and Fe: Can *Helianthus annuus* hyperaccumulate multiple heavy metals?. *Chemosphere*, 70(3), 531-537.
- Kabata-Pendias, A., and Pendias, H. 2000. *Trace Elements in Soils and Plants* (3 ed.). New York: CRC Press.
- Kelly, M. 2017. Types of Hydroponics Systems: A Complete Guide. Retrieved January 12, 2017, from <http://hydroponicsgrower.org/introduction-to-different-types-of-hydroponics-systems/>
- Kochian, L. V. 1991. Mechanisms of micronutrient uptake and translocation in plants. In: Mortvedt, J.J., Cox, F.R., Shuman, L.M. and Welch R.M., Editors, *Micronutrient agriculture*. Soil Society of America, Medison (WI). 229-296.
- Lai, H. Y., and Chen, Z. S. 2004. Effects of EDTA on solubility of cadmium, zinc, and lead and their uptake by rainbow pink and vetiver grass. *Chemosphere*, 55(3), 421-430.
- Liphadzi, M., and Kirkham, M. 2006. Availability and plant uptake of heavy metals in EDTA-assisted phytoremediation of soil and composted biosolids. *South African Journal of Botany*, 72(3), 391-397.
- Lu, X., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P., and Homyok, K. 2004. Removal of cadmium and zinc by water hyacinth, *Eichhornia crassipes*. *Science Asia*, 30(93), 103.

- Luo, C., Shen, Z., Li, X., and Baker, A. J. (2006). Enhanced phytoextraction of Pb and other metals from artificially contaminated soils through the combined application of EDTA and EDDS. *Chemosphere*, 63(10), 1773-1784.
- Mannetje, L. 1992. *Pennisetum purpureum* Schumach. In: 't Mannetje, L. and Jones, R.M. (eds) *Plant Resources of South-East Asia No. 4. Forages*. pp. 191-192. Pudoc Scientific Publishers, Wageningen, the Netherlands.
- Maryadele, J., Smith, A., Heckelman, P. E., Obenchain, J. R., Gallipeau, J. A., and M.A., A. 2001. *The Merck Index An Encyclopedia of Chemical*. Whitehouse Station, New Jersey: Merck & Co.
- Mason, J. 1990. *Commercial Hydroponics*. Kenthurst Australia Kangaroo Press Pty.Ltd., 172 pp.
- McGrath, S., Lombi, E., Gray, C., Caille, N., Dunham, S., and Zhao, F. 2006. Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri*. *Environmental Pollution*, 141(1), 115-125.
- Nakbanpote, W., Sukadeetad, K., Paitlertumpai, N., Meesungeon, O., and Noisa-nguan, W. 2010. *Advances in Phytoremediation Research: A Case Study of Gynura pseudochina (L.) DC*: INTECH Open Access Publisher.
- Nanthavong, K. 2012. *Effect of Nitrilotriacetic Acid (NTA) and Ethylenediaminetetraacetic Acid (EDTA) on Arsenic Uptake from Contaminated Soil by Mimosa Pudica L.*, Environmental Management, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Quartacci, M. F., Irtelli, B., Baker, A. J., and Navari-Izzo, F. 2007. The use of NTA and EDDS for enhanced phytoextraction of metals from a multiply contaminated soil by *Brassica carinata*. *Chemosphere*, 68(10), 1920-1928.
- Robinson, B. H., Mills, T. M., Petit, D., Fung, L. E., Green, S. R., and Clothier, B. E. 2000. Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: implications for phytoremediation. *Plant and Soil*, 227(1), 301-306.
- Rungruang, N., Babel, S., and Parkpian, P. 2011. Screening of potential hyperaccumulator for cadmium from contaminated soil. *Desalination and Water Treatment*, 32(1-3), 19-26.

- Sabeen, M., Mahmood, Q., Irshad, M., Fareed, I., Khan, A., Ullah, F., and Tabassum, S. 2013. Cadmium phyto remediation by *Arundo donax* L. from contaminated soil and water. *BioMed research international*, 2013.
- Salt, D. E., Smith, R., and Raskin, I. 1998. Phyto remediation. *Annual review of plant biology*. Physiology and Plant Molecular Biology. 49(1), 643-668.
- Sampanpanish, P. 2006. Chromium Uptake by Using Hydroponics with Monocot Weed Plant Species in Thailand. *Chemeca 2006: Knowledge and Innovation*, 891.
- Sampanpanish, P., and Tippayasak, K. 2007. *Chromium Uptake on Speciation and Phytotoxicity Using Hydroponics by Aquatic Plants*. Paper presented at the In Proceeding at The 34th Australasian Chemical Engineering Conference (CHEMECA 2007). p.72.
- Santos, F. S., Hernández-Allica, J., Becerril, J. M., Amaral-Sobrinho, N., Mazur, N., and Garbisu, C. 2006. Chelate-induced phytoextraction of metal polluted soils with *Brachiaria decumbens*. *Chemosphere*, 65(1), 43-50.
- Schor-Fumbarov, T., Keilin, Z., and Tel-Or, E. 2003. Characterization of cadmium uptake by the water lily *Nymphaea aurora*. *International journal of phyto remediation*, 5(2), 169-179.
- Shah, F., Ahmad, N., Masood, K., and Zahid, D. 2008. The influence of cadmium and chromium on the biomass production of shisham (*Dalbergia sissoo* ROXB.) seedlings. *Pak. J. Bot*, 40(4), 1341-1348.
- Shen, Z. G., Li, X. D., Wang, C. C., Chen, H. M., and Chua, H. 2002. Lead phytoextraction from contaminated soil with high-biomass plant species. *Journal of environmental quality*, 31(6), 1893-1900.
- Sollenberger, L. E., Prine, G. M., Ocumpaugh, W. R., Hanna, W. W., Jones, C.S., Schank JR., S. C., and Kalmbacher, R.S., 1989. Registration of Mott Dwarf Elephant Grass. *Crop Science*. 29: 827-828.
- Steve, G. 2007. It's Elemental Cadmium. *Newport News, VA: Jefferson Lab*. [Online]. Available from: <http://education.jlab.org/itselemental/ele048.html> [2014, November 15]
- Sun, B., Zhao, F., Lombi, E., and Mcgrath, S. 2001. Leaching of heavy metals from contaminated soils using EDTA. *Environmental Pollution*, 113(2), 111-120.

- Taiz, L. and Zeiger, E. 2010. *Plant Physiology*, 5th Edition. The Benjamin Cummings Publishing Company, Redwood City - California.
- Tabatahai, M., and Bremner, J. 1975. Decomposition of nitrilotriacetate (NTA) in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 7(2), 103-106.
- Tananonchai, A. 2011. *Effect of EDTA and DTPA on cadmium removal from contaminated soil with Eichhornia crassipes (water hyacinth)*. Environmental Management, Graduate School, Chulalongkorn University.
- Tancharakorn, S., Tanthanuch, W., Kamonsutthipajit, N., Wongprachanukul, N., Sophon, M., Chaichuay, S., and Yimnirun, R. 2012. The first microbeam synchrotron X-ray fluorescence beamline at the Siam Photon Laboratory. *Journal of synchrotron radiation*, 19(4), 536-540.
- Traina, S. J. 1999. The Environmental Chemistry of Cadmium *Cadmium in Soils and Plants*, pp. 11-37. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Tuntullveat, M. S. 2012. *Chemical in water and waste water*: Chulalongkorn University, Bangkok Thailand.
- Turan, M., and Esringu, A. 2007. Phytoremediation based on canola (*Brassica napus* L.) and Indian mustard (*Brassica juncea* L.) planted on spiked soil by aliquot amount of Cd, Cu, Pb, and Zn. *Plant Soil and Environment*, 53(1), 7.
- USEPA. 1996. *Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceous and Organically Based Matrices. Method. 3052*. Washington D. C., USA.
- USEPA. 1998. *Microwave Assisted Acid Digestion of Aqueous Samples and Extract. Method. 3015A*. Washington D. C., USA.
- USEPA. 1999. *Phytoremediation resource guide*. Office of Solid Waste and Emergency Response (5102G), EPA542-B-99-003.
- USEPA. 2000. *Introduction to Phytoremediation*. EPA 600/R-99/107. Cincinnati, OH: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, USA.
- Van Ginkel, C., Kester, H., Stroo, C., and Van Haperen, A. 1999. Biodegradation of EDTA in pulp and paper mill effluents by activated sludge. *Water science and technology*, 40(11-12), 259-265.

- Wallace, A., Romney, E. M., Alexander, G. V., Soufi, S. M., and Patel, P. M. 1977. Some interactions in plants among cadmium, other heavy metals, and chelating agents. *Agronomy Journal*, 69(1), 18-20.
- Wang, K. S., Huang, L. C., Lee, H. S., Chen, P. Y., and Chang, S. H. 2008. Phytoextraction of cadmium by *Ipomoea aquatica* (water spinach) in hydroponic solution: effects of cadmium speciation. *Chemosphere*, 72(4), 666-672.
- 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.
- World Health Organization. 1992. *Cadmium-Environmental Aspects. Environmental Health Criteria* 135. Finland.
- Yongpisanphop, J., Kruatrachue, M., and Pokethitiyook, P. 2005. Toxicity and accumulation of lead and chromium in *Hydrocotyle umbellata*. *Journal of Environmental Biology*, 26(1), 79-89.
- Zacchini, M., Pietrini, F., Mugnozza, G. S., Iori, V., Pietrosanti, L., and Massacci, A. 2009. Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics. *Water, Air, and Soil Pollution*, 197(1-4), 23-34.
- Zhang, X., Zhang, X., Gao, B., Li, Z., Xia, H., Li, H., and Li, J. 2014. Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of an energy crop, king grass (*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*). *Biomass and Bioenergy*, 67, 179-187.
- Zhao, H. Y., Lin, L. J., Yan, Q. L., Yang, Y. X., Zhu, X. M., and Shao, J. R. 2011. Effects of EDTA and DTPA on lead and zinc accumulation of ryegrass. *Journal of Environmental Protection*, 2(07), 932.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY






ภาคผนวก ก

ลักษณะการแสดงความผิดปกติของพืช

ตารางที่ ก-1 ลักษณะการแสดงความผิดปกติจากการขาดธาตุอาหาร (พันธุศาสตร์, 2558)

	อาการขาดธาตุไนโตรเจน ในพืช ใบมีสีเขียวจางแล้ว เปลี่ยน เป็นสีเหลือง โดยเฉพาะใบแก่ที่อยู่ ตอนล่างของพืช		อาการขาดธาตุกำมะถันใน พืช ใบแก่และใบที่อยู่ ส่วนล่างมีสีเหลือง ส่วนที่ ลำต้นพืชนั้นจะแข็งและ บอบบาง
	อาการขาดธาตุฟอสฟอรัส ในพืช ใบพืชมีลักษณะสี ม่วงแดงบนแผ่นใบ เส้นใบ และลำต้น		อาการขาดธาตุแคลเซียม ในพืชใบเหลืองเกิดลาย บริเวณขอบใบ และมีจุด ประขาวอยู่บนยอดใบ อาการคล้ายยอดด่าง
	อาการขาดธาตุ โพแทสเซียมในพืชใบแห้ง เป็นมัน พบเห็นชัดเจนใน ใบที่อยู่ส่วนล่างๆ ของต้น พืช		อาการขาดธาตุเหล็กในพืช ใบอ่อนแสดงอาการสี เหลือง และมีขนาดเล็ก กว่าปกติ
	อาการขาดธาตุคลอรีนใน พืช ใบมีจุดประสีเหลืองอยู่ ทั่วทั้งใบ ตรงกลางมีจุดสี น้ำตาล มักเกิดในใบที่อยู่ ตอนล่างของต้น		อาการขาดธาตุสังกะสีใน พืช ที่โคนใบพืชมีแถบสี เขียวเหลือง
	อาการขาดธาตุโบรอนใน พืช ขอบใบมีสีเหลืองปน น้ำตาล และใบอ่อนงอ		อาการขาดธาตุทองแดงใน พืช ใบมีสีเหลือง ใบยาว ผิดปกติ ใบย่นและอ่อน
	อาการขาดธาตุแมงกานีส ในพืช ใบมีขนาดเล็ก ผิดปกติ ใบมีสีเหลือง โดย ที่เส้นใบยังคงมีสีเขียวอยู่ มีจุดสีน้ำตาลเล็กๆ และ อาจขยายวงกว้าง		อาการขาดธาตุโมลิบดีนัม ในพืช ใบมีสีจางซีด ผิดปกติ ใบมีลักษณะแคบ ช่องว่างระหว่างเส้นใบจะ มีสีเหลือง

ตารางที่ ข-2 ลักษณะการแสดงความผิดปกติของพืชจากโรคพืช (พันธวัศ, 2558)

	<p>โรคใบเหลือง ใบพืชมีลักษณะเป็นจุดสีเหลืองเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไป และลามขึ้นไปสู่ใบยอด</p>		<p>โรคใบสีส้ม ลักษณะใบเป็นรอยต่างของคลอโรฟิลล์ที่ถูกทำลายหายไป และมักจะมีจุดแผลของโรคใบจุดสีน้ำตาล</p>
	<p>โรคใบขีดโปร่งแสง ใบพืชมีลักษณะเป็นขีดข้ำสีเหลือง หรือส้มยาวตามเส้นใบ และแสงทะลุผ่านได้</p>		<p>โรคใบปื้นเหลือง ใบมีจุดกลมสีเหลือง เมื่อเป็นมากๆ จะขยายติดต่อกันเป็นปื้นเหลือง</p>
	<p>โรคแอนแทรคโนส ใบมีแผลสีน้ำตาล เป็นวงเรียงซ้อนกันหลายๆ ชั้น เกิดที่ปลายใบและกลางใบจะมีกลุ่มของเชื้อราสีดำเกิดขึ้นเป็นวงซ้อนกัน</p>		<p>โรคใบหงิกหรือโรคจู๋ เส้นใบบวมเป็นสีเหลือง สีขาว นวลหรือสีน้ำตาลแก่ มีอาการบวมสูงจากผิวใบ</p>
	<p>โรคราสนิม ใบพืชเป็นแผลตายสีน้ำตาลขนาดเท่าหัวเข็มหมุดกระจายอยู่ทั่วผิวใบ เริ่มจากใบล่างแล้วค่อยๆ ลุกลามขึ้นสู่ใบบน</p>		<p>โรคแคงเกอร์ ใบมีลักษณะเป็นแผลกลม มีสีเหลืองอ่อนถึงเหลืองเข้มและจะแตกเป็นสะเก็ดมีวงสีเหลืองล้อมรอบ</p>
	<p>โรคราสนิม แผลเกิดขึ้นบนใบและกาบใบ แผลมีสีส้มเข้ม ซึ่งเป็นสปอร์ที่เชื้อราสร้างขึ้นมา เริ่มปรากฏจากใบล่างๆ แล้วลามขึ้นไปทางยอด</p>		<p>โรคใบจุดหรือโรคขีดกลาก จะมีแผลที่ใบคล้ายรูปกระสวย ถ้าเป็นมากจะรวมกันอยู่เป็นแผ่น ตรงกลางแผลมีตุ่มนูนสีน้ำตาลดำ เกิดได้ทั้งหน้าใบ และใต้ใบ</p>
	<p>โรคใบขาว ใบพืชเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวย่อมนหรือขาวซีด โดยเริ่มจากโคนใบแล้วขนานไปตามความยาวของใบและขยายจนเต็มใบ</p>		<p>โรคราน้ำค้างหรือโรคใบลาย เกิดเป็นปื้นเหลืองบนใบ ด้านหลังของใบอาจมองเห็นกลุ่มของเส้นใย และมีขุยของราสีขาวหม่นคล้ายผงแป้ง</p>

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

1. ปริมาณการดูดซับแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระเมื่อเติมสารอีดีทีเอ (EDTA)

1.1 ปริมาณการดูดซับแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระเมื่อเติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ในส่วนได้น้ำ (ราก)

ตารางที่ ข-1 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนได้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 1 ของการทดลอง



ANOVA

วันที่ 1 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	18019.088	2	9009.544	20.452	.002
Within Groups	2643.148	6	440.525		
Total	20662.236	8			



วันที่ 1

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	241.5700	
EDTA (1:0.5 mol)	3	276.9633	
EDTA (1:1 mol)	3		349.1000
Sig.		.084	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-2 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 15 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 15 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	50848.451	2	25424.225	30.263	.001
Within Groups	5040.634	6	840.106		
Total	55889.084	8			



วันที่ 15

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
Control	3	305.4067		
EDTA (1:0.5 mol)	3		406.2667	
EDTA (1:1 mol)	3			489.2333
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-3 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 30 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 30 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	356431.748	2	178215.874	108.892	.000
Within Groups	9819.787	6	1636.631		
Total	366251.535	8			



วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
Control	3	427.9333		
EDTA (1:0.5 mol)	3		522.3800	
EDTA (1:1 mol)	3			889.3133
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-4 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 45 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 45 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	61328.928	2	30664.464	40.338	.000
Within Groups	4561.182	6	760.197		
Total	65890.110	8			



วันที่ 45

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
Control	3	433.6233		
EDTA (1:0.5 mol)	3		503.2300	
EDTA (1:1 mol)	3			632.8367
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-5 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 60 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 60 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	88451.359	2	44225.679	56.451	.000
Within Groups	4700.624	6	783.437		
Total	93151.983	8			



วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
Control	3	371.4700		
EDTA (1:0.5 mol)	3		440.9900	
EDTA (1:1 mol)	3			607.7267
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-6 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 75 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 75 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	39634.997	2	19817.499	23.797	.001
Within Groups	4996.689	6	832.781		
Total	44631.686	8			



วันที่ 75

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	455.8933	575.0700
EDTA (1:0.5 mol)	3	419.7467	
EDTA (1:1 mol)	3		
Sig.		.176	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-7 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 90 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 90 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	18908.650	2	9454.325	24.592	.001
Within Groups	2306.697	6	384.449		
Total	21215.347	8			



วันที่ 90

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	469.4033	559.0500
EDTA (1:0.5 mol)	3	455.6867	
EDTA (1:1 mol)	3		
Sig.		.424	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-8 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 105 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 105 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	25670.155	2	12835.078	22.886	.002
Within Groups	3365.001	6	560.834		
Total	29035.156	8			



วันที่ 105

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	463.6733	567.8167
EDTA (1:0.5 mol)	3	447.1833	
EDTA (1:1 mol)	3		
Sig.		.426	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

1.2 ปริมาณการดูดซับแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคะเมื่อเติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ในส่วนหน่อ (ลำต้น และใบ)

ตารางที่ ข-9 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนหน่อ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคะในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 1 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 1 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5016.884	2	2508.442	23.471	.001
Within Groups	641.258	6	106.876		
Total	5658.142	8			



วันที่ 1

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
Control	3	65.3233		
EDTA (1:0.5 mol)	3		88.4600	
EDTA (1:1 mol)	3			122.7933
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-10 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 15 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 15 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1560.962	2	780.481	2.012	.214
Within Groups	2327.193	6	387.866		
Total	3888.156	8			



วันที่ 15

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
Control	3	201.0333
EDTA (1:0.5 mol)	3	228.3333
EDTA (1:1 mol)	3	199.8000
Sig.		.137

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-11 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 30 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 30 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	8403.356	2	4201.678	9.242	.015
Within Groups	2727.882	6	454.647		
Total	11131.238	8			



วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	187.4700	
EDTA (1:0.5 mol)	3		246.2767
EDTA (1:1 mol)	3		256.9733
Sig.		1.000	.562

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-12 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 45 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 45 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3283.862	2	1641.931	2.642	.150
Within Groups	3728.710	6	621.452		
Total	7012.572	8			



วันที่ 45

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
Control	3	218.0833
EDTA (1:0.5 mol)	3	236.1633
EDTA (1:1 mol)	3	264.4967
Sig.		.070

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-13 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 60 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 60 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	11430.086	2	5715.043	11.932	.008
Within Groups	2873.707	6	478.951		
Total	14303.793	8			



วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	173.1700	
EDTA (1:0.5 mol)	3		229.6567
EDTA (1:1 mol)	3		259.0500
Sig.		1.000	.151

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-14 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 75 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 75 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7408.315	2	3704.158	23.995	.001
Within Groups	926.227	6	154.371		
Total	8334.543	8			



วันที่ 75

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	196.4733	
EDTA (1:0.5 mol)	3		247.3933
EDTA (1:1 mol)	3		263.8800
Sig.		1.000	.155

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-15 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 90 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 90 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	8684.183	2	4342.091	10.059	.012
Within Groups	2589.913	6	431.652		
Total	11274.096	8			



วันที่ 90

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	184.3967	
EDTA (1:0.5 mol)	3	220.5200	220.5200
EDTA (1:1 mol)	3		260.4533
Sig.		.077	.057

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-16 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) (n=3) วันที่ 105 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 105 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2222.335	2	1111.167	2.400	.171
Within Groups	2777.795	6	462.966		
Total	5000.130	8			



วันที่ 105

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
Control	3	187.3900
EDTA (1:0.5 mol)	3	191.9767
EDTA (1:1 mol)	3	222.7800
Sig.		.100

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

1.2 ปริมาณการดูดตั้งแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระเมื่อเติมสารเอ็นทีเอ (NTA)

1.1 ปริมาณการดูดตั้งแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคระเมื่อเติมสารเอ็นทีเอ (NTA) ในส่วนใต้น้ำ (ราก)

ตารางที่ ข-17 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 1 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 1 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	10919.520	2	5459.760	42.989	.000
Within Groups	762.018	6	127.003		
Total	11681.537	8			



วันที่ 1

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	241.5700	311.1133
NTA (1:0.5 mol)	3	233.5333	
NTA (1:1 mol)	3		
Sig.		.416	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-18 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคะระในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 15 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 15 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	58110.706	2	29055.353	104.493	.000
Within Groups	1668.360	6	278.060		
Total	59779.066	8			



วันที่ 15

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
Control	3	305.4067		
NTA (1:0.5 mol)	3		383.0633	
NTA (1:1 mol)	3			500.8633
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-19 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 30 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 30 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	75991.924	2	37995.962	100.054	.000
Within Groups	2278.531	6	379.755		
Total	78270.455	8			



วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	427.9333	638.9833
NTA (1:0.5 mol)	3	465.7133	
NTA (1:1 mol)	3		
Sig.		.055	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-20 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 45 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 45 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	32207.387	2	16103.694	94.188	.000
Within Groups	1025.848	6	170.975		
Total	33233.236	8			



วันที่ 45

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	433.6233	549.9667
NTA (1:0.5 mol)	3	414.6467	
NTA (1:1 mol)	3		
Sig.		.126	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-21 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 60 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 60 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	38488.751	2	19244.376	279.442	.000
Within Groups	413.204	6	68.867		
Total	38901.955	8			



วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
Control	3	371.4700		
NTA (1:0.5 mol)	3		398.5100	
NTA (1:1 mol)	3			521.7233
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-22 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 75 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 75 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	8599.783	2	4299.892	22.643	.002
Within Groups	1139.414	6	189.902		
Total	9739.197	8			



วันที่ 75

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3		455.8933
NTA (1:0.5 mol)	3	400.1433	
NTA (1:1 mol)	3		472.3900
Sig.		1.000	.193

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-23 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 90 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 90 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5094.136	2	2547.068	57.057	.000
Within Groups	267.844	6	44.641		
Total	5361.980	8			



วันที่ 90

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3		469.4033
NTA (1:0.5 mol)	3	414.3833	
NTA (1:1 mol)	3		458.5267
Sig.		1.000	.093

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-24 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 105 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 105 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4662.515	2	2331.257	6.723	.029
Within Groups	2080.651	6	346.775		
Total	6743.166	8			



วันที่ 105

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3		463.6733
NTA (1:0.5 mol)	3	420.0300	
NTA (1:1 mol)	3	411.8067	
Sig.		.608	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

1.2 ปริมาณการดูดตั้งแคดเมียมในหญ้าเนเปียร์แคะเมื่อเติมสารเอ็นทีเอ (NTA) ในส่วนเหนือลำต้น และใบ)

ตารางที่ ข-25 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือลำต้น และใบ ของหญ้าเนเปียร์แคะในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 1 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 1 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4728.198	2	2364.099	40.609	.000
Within Groups	349.293	6	58.216		
Total	5077.491	8			



วันที่ 1

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
Control	3	65.3233		
NTA (1:0.5 mol)	3		85.1733	
NTA (1:1 mol)	3			120.7300
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-26 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 15 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 15 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	203.296	2	101.648	.348	.719
Within Groups	1751.553	6	291.926		
Total	1954.849	8			



วันที่ 15

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
Control	3	201.0333
NTA (1:0.5 mol)	3	189.4000
NTA (1:1 mol)	3	194.8333
Sig.		.450

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-27 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 30 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 30 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7614.670	2	3807.335	16.171	.004
Within Groups	1412.646	6	235.441		
Total	9027.315	8			



วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	187.4700	
NTA (1:0.5 mol)	3		240.3867
NTA (1:1 mol)	3		255.2467
Sig.		1.000	.280

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-28 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 45 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 45 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	210.252	2	105.126	.659	.551
Within Groups	957.521	6	159.587		
Total	1167.772	8			



วันที่ 45

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
Control	3	218.0833
NTA (1:0.5 mol)	3	229.3500
NTA (1:1 mol)	3	226.8667
Sig.		.331

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-29 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 60 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 60 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4726.496	2	2363.248	6.330	.033
Within Groups	2239.883	6	373.314		
Total	6966.379	8			



วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	173.1700	
NTA (1:0.5 mol)	3		220.4167
NTA (1:1 mol)	3		223.0433
Sig.		1.000	.873

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-30 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 75 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 75 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	696.194	2	348.097	2.174	.195
Within Groups	960.703	6	160.117		
Total	1656.896	8			



วันที่ 75

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
Control	3	196.4733
NTA (1:0.5 mol)	3	216.9733
NTA (1:1 mol)	3	200.9867
Sig.		.104

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-31 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 90 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 90 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1877.995	2	938.998	14.335	.005
Within Groups	393.027	6	65.504		
Total	2271.022	8			



วันที่ 90

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	184.3967	
NTA (1:0.5 mol)	3		218.6767
NTA (1:1 mol)	3		209.1300
Sig.		1.000	.199

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-32 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารเอ็นทีเอ (NTA) (n=3) วันที่ 105 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 105 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	226.251	2	113.125	.372	.704
Within Groups	1825.189	6	304.198		
Total	2051.440	8			



วันที่ 105

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
Control	3	187.3900
NTA (1:0.5 mol)	3	181.4133
NTA (1:1 mol)	3	193.6933
Sig.		.436

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

3. ปริมาณการดูดซับแคดเมียมของหญ้าเนเปียร์แคระเมื่อเติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ (NTA)

1.1 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3)

ตารางที่ ข-33 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนใต้น้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 1 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 1 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	28129.698	2	14064.849	91.569	.000
Within Groups	921.592	6	153.599		
Total	29051.291	8			



วันที่ 1

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
Control	3	241.5700		
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3		292.5433	
EDTA+NTA (1:1 mol)	3			377.1300
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-34 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 15 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 15 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	53773.157	2	26886.579	37.628	.000
Within Groups	4287.234	6	714.539		
Total	58060.391	8			



วันที่ 15

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
Control	3	305.4067		
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3		414.5333	
EDTA+NTA (1:1 mol)	3			493.9667
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-35 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 30 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 30 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	42850.330	2	21425.165	58.847	.000
Within Groups	2184.509	6	364.085		
Total	45034.839	8			



วันที่ 30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
Control	3	427.9333		
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3		502.7033	
EDTA+NTA (1:1 mol)	3			596.5900
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-36 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 45 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 45 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	50211.026	2	25105.513	49.091	.000
Within Groups	3068.476	6	511.413		
Total	53279.502	8			



วันที่ 45

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	433.6233	606.2533
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3	467.4533	
EDTA+NTA (1:1 mol)	3		
Sig.		.117	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-37 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 60 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 60 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	65517.016	2	32758.508	231.213	.000
Within Groups	850.085	6	141.681		
Total	66367.101	8			



วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
Control	3	371.4700		
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3		478.4300	
EDTA+NTA (1:1 mol)	3			580.4433
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-38 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 75 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 75 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	16802.687	2	8401.344	32.491	.001
Within Groups	1551.447	6	258.575		
Total	18354.134	8			



วันที่ 75

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	455.8933	528.5733
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3	425.6033	
EDTA+NTA (1:1 mol)	3		
Sig.		.061	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-39 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 90 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 90 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	10090.881	2	5045.440	45.624	.000
Within Groups	663.527	6	110.588		
Total	10754.408	8			



วันที่ 90

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3		469.4033
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3	406.1833	
EDTA+NTA (1:1 mol)	3		483.0467
Sig.		1.000	.163

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-40 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนไตน้ำ (ราก) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 105 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 105 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3305.078	2	1652.539	4.494	.064
Within Groups	2206.528	6	367.755		
Total	5511.605	8			



วันที่ 105

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3		463.6733
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3	416.7800	
EDTA+NTA (1:1 mol)	3	442.0433	442.0433
Sig.		.158	.216

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

1.2 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3)

ตารางที่ ข-41 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 1 ของการทดลอง

ANOVA

วันที่ 1 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7871.674	2	3935.837	112.206	.000
Within Groups	210.461	6	35.077		
Total	8082.135	8			



วันที่ 1

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
Control	3	65.3233		
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3		84.9767	
EDTA+NTA (1:1 mol)	3			135.5333
Sig.		1.000	1.000	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-42 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 1 ของการ
 ทดลอง

ANOVA

วันที่ 15 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	96.676	2	48.338	.263	.777
Within Groups	1104.570	6	184.095		
Total	1201.246	8			

วันที่ 15

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
Control	3	201.0333
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3	193.0633
EDTA+NTA (1:1 mol)	3	197.8833
Sig.		.512

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-43 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 30 ของการ
 ทดลอง

ANOVA

วันที่ 30 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	9790.038	2	4895.019	38.999	.000
Within Groups	753.091	6	125.515		
Total	10543.128	8			

30

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	187.4700	
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3		249.6100
EDTA+NTA (1:1 mol)	3		263.2500
Sig.		1.000	.187

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-44 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 45 ของการ
 ทดลอง

ANOVA

วันที่ 45 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	311.732	2	155.866	.900	.455
Within Groups	1039.260	6	173.210		
Total	1350.992	8			

วันที่ 15

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
Control	3	218.0833
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3	230.0267
EDTA+NTA (1:1 mol)	3	231.0467
Sig.		.287

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-45 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 60 ของการ
 ทดลอง

ANOVA

วันที่ 60 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4639.193	2	2319.596	13.564	.006
Within Groups	1026.057	6	171.010		
Total	5665.250	8			

วันที่ 60

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	173.1700	
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3		222.1233
EDTA+NTA (1:1 mol)	3		220.5000
Sig.		1.000	.884

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-46 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 75 ของการ
 ทดลอง

ANOVA

วันที่ 75 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2353.756	2	1176.878	9.870	.013
Within Groups	715.392	6	119.232		
Total	3069.148	8			

วันที่ 75 ของการทดลอง

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	196.4733	
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3		236.0767
EDTA+NTA (1:1 mol)	3	217.0233	217.0233
Sig.		.061	.076

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-47 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 90 ของการ
 ทดลอง

ANOVA

วันที่ 90 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2110.634	2	1055.317	5.009	.053
Within Groups	1264.049	6	210.675		
Total	3374.683	8			

วันที่ 90 ของการทดลอง

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
Control	3	184.3967	
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3	213.0733	213.0733
EDTA+NTA (1:1 mol)	3		219.6767
Sig.		.052	.598

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ตารางที่ ข-48 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ของหญ้าเนเปียร์
 แคระในชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ (EDTA) ร่วมกับสารเอนทีเอ EDTA (n=3) วันที่ 105 ของการ
 ทดลอง

ANOVA

วันที่ 105 ของการทดลอง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	870.538	2	435.269	1.905	.229
Within Groups	1371.164	6	228.527		
Total	2241.703	8			

วันที่ 105 ของการทดลอง

Duncan^a

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05
		1
Control	3	187.3900
EDTA+NTA (1:0.5 mol)	3	211.4700
EDTA+NTA (1:1 mol)	3	198.8100
Sig.		.109

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวมนทิตรา สุขเจริญ เกิดเมื่อวันเสาร์ที่ 20 เดือน เมษายน พ.ศ. 2534 ที่อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจาก โรงเรียนดาราจรัส จังหวัดฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนสุนรรวิทยา จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2555 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (เกียรตินิยมอันดับสอง) จากมหาวิทยาลัยศิลปากร จากนั้นในปีการศึกษา 2556 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิตศึกษา หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และในระหว่างการศึกษา 2559 ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัยแบบบรรยาย (Oral presentation) ในการประชุมวิชาการระดับชาติ และได้รับการพิจารณาคัดเลือกผลงานให้ตีพิมพ์ลงในวารสารฯ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

มนทิตรา สุขเจริญ และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2559. “ผลของกรดเอทิลีนไดเอมีนเททระอะซีติกเอซิด (อีดีทีเอ) และกรดไนตริโลไทรอะซีติกเอซิด (เอนทีเอ) ต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ” ในเอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 15 จัดโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย วันที่ 11-13 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์, กรุงเทพมหานคร.

มนทิตรา สุขเจริญ และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2559. “ผลของกรดเอทิลีนไดเอมีนเททระอะซีติกเอซิด (อีดีทีเอ) และกรดไนตริโลไทรอะซีติกเอซิด (เอนทีเอ) ต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ” วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย, 30(3), 95-104.