

ผลของสารอีดีทีเอต่อการดูดตั้งแคดเมียมในดินปนเปื้อนด้วยเฮมพ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effect of EDTA on cadmium uptake in contaminated soil with hemp



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Environmental Science

Inter-Department of Environmental Science

GRADUATE SCHOOL

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสารอีทีทีเอต่อการดูดตั้งแคดเมียมในดินปนเปื้อนด้วยเฮมพ์
โดย	น.ส.อชิรญาณ์ คณศรัภษพงษ์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมบุญ หนูจักร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.ตุลวิทย์ สถาปนจารุ)

.....  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อชิรญาณ์ คณศรัภษพงษ : ผลของสารอีดีทีเอต่อการดูดตั้งแคดเมียมในดินปนเปื้อนด้วยเฮมพ์. ( Effect of EDTA on cadmium uptake in contaminated soil with hemp) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.พันธ์วัศ สัมพันธ์พานิช

การศึกษผลของสารอีดีทีเอต่อการดูดตั้งแคดเมียมในดินปนเปื้อนด้วยเฮมพ์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้สารอีดีทีเอในการบำบัดดินปนเปื้อนด้วยการปลูกเฮมพ์ เพื่อศึกษาความสามารถของพืชในการดูดตั้ง และสะสมแคดเมียมไปไว้ส่วนต่าง ๆ และทำการประเมินความเสี่ยงจากการปลูกเฮมพ์ที่ผ่านการปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์ โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุด ได้แก่ 1) ชุดควบคุมที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_1$ ) 2) ชุดควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_2$ ) 3) ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมที่เติมสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:1 โมล ( $T_1$ ) และ 4) ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมที่เติมสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) และทำการทดลองเป็นระยะเวลา 120 วัน โดยนับวันที่เพาะปลูกเมล็ดเฮมพ์ลงในกระถางเป็นวันแรกของการทดลอง และได้ทำการเก็บตัวอย่างดินและพืชที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการดูดตั้งและสะสมแคดเมียมในส่วนได้ดิน (ราก) และส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) ของเฮมพ์ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ชุดการทดลอง  $T_1$  เป็นชุดที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียมสูงที่สุด อีกทั้งยังเป็นชุดการทดลองที่เฮมพ์มีการดูดตั้งและสะสมแคดเมียมไปไว้ในส่วนต่าง ๆ สูงสุดเช่นกัน รองลงมาคือ ชุดการทดลอง  $C_2 > T_2 > C_1$  ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าที่ระยะเวลา 120 วัน ชุดการทดลอง  $T_1$  มีปริมาณแคดเมียมสะสมในดินน้อยที่สุด เท่ากับ 30.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และพบว่า เฮมพ์มีความสามารถในการสะสมแคดเมียมในส่วนรากสูงที่สุดในทุกชุดการทดลอง รองลงมาคือ เปลือก>แกน>ใบ สาเหตุที่เฮมพ์ที่ปลูกในชุดการทดลอง  $T_2$  ซึ่งมีการเติมสารอีดีทีเอในปริมาณความเข้มข้นสูงนั้น มีการสะสมแคดเมียม (112.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) น้อยกว่าชุดการทดลอง  $T_1$  และ  $C_2$  ที่มีค่าการสะสมแคดเมียมในรากเท่ากับ 122.07 และ 116.55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ นั้นอาจเกิดมาจากการเติมสารอีดีทีเอในปริมาณความเข้มข้นที่สูงเกินไป จึงส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชเมื่อทำการประเมินความเสี่ยงจากความเป็นพิษของแคดเมียมผ่านการกิน บริเวณส่วนเปลือก (เส้นใย) และแกนของเฮมพ์ พบว่าบริเวณส่วนเปลือก (เส้นใย) และแกนของเฮมพ์ที่ปลูกในทุกชุดการทดลอง ไม่แสดงความเป็นพิษที่จะก่อให้เกิดโรครังโรคมะเร็ง และโรคอื่น ๆ ที่ไม่ใช่โรคมะเร็ง ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า สารอีดีทีเอนั้นมีประสิทธิภาพในการช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดตั้งและสะสมแคดเมียมในเฮมพ์ จึงสามารถนำผลการศึกษาในครั้งนี้ ไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ปนเปื้อนจริงได้ อีกทั้งยังสามารถนำผลการศึกษาไป เป็นแนวทางเลือกในการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากเฮมพ์ที่ผ่านการปลูกในดินปนเปื้อนมาเป็นผลิตภัณฑ์ชุมชน เพื่อสร้างเสริมรายได้อันจะนำไปสู่การพัฒนาคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นของชุมชนได้อย่างยั่งยืน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6187246220 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: Hemp Cadmium EDTA Phytoremediation Phytotoxicity

Achiraya Kanedrukpong : Effect of EDTA on cadmium uptake in contaminated soil with hemp.

Advisor: Assoc. Prof. PANTAWAT SAMPANPANISH, Ph.D.

The effect of EDTA on cadmium removal from the contaminated soil by hemp was studied. This study aims to study the efficiency of EDTA addition on the accumulation, movement and distribution of cadmium in hemp as well as to assess the risk of hemp which was cultivated in the contaminated soil for the further appropriate utilization. The experiments were divided into 4 sets including uncontaminated soil (Control Set 1 :  $C_1$ ), cadmium-contaminated soil (Control Set 2 :  $C_2$ ), cadmium-contaminated soil with EDTA addition at the mole ratio of 1:1 ( $T_1$ ) and cadmium-contaminated soil with EDTA addition at the mole ratio of 1:2 ( $T_2$ ). The experiments over a period of 120 days were conducted by counting the day of planting hemp seeds as the first day of the experiment. Plant and soil samples were collected at 30, 60, 90 and 120 days. The cadmium accumulations in the underground (roots) and aboveground (stems and leaves) parts of hemp were determined. The results showed that  $T_1$  showed the highest cadmium removal efficiency and highest cadmium accumulation in hemp following by  $C_2 > T_2 > C_1$ , respectively. At the end of the experiment (120 days), it was found that  $T_1$  has the lowest cadmium concentration in soil of 30.03 mg/kg. In addition, all treatments had the highest cadmium accumulation in roots following by fibers, stems and leaves, respectively. A reason of lower cadmium accumulation in the roots of plant grown in  $T_2$  (112.70 mg/kg) than those of  $T_1$  (122.07 mg/kg) and  $C_2$  (116.55 mg/kg) may be due to the excessive EDTA addition causing phytotoxicity to plant. The results of human risk assessment through ingestion of hemp fibers and stems showed negligible potential health impacts of both carcinogenic and non-carcinogenic diseases. Based on the results obtained, it can be concluded that EDTA can effectively enhance the uptake and accumulation cadmium by hemp. Therefore, it can be used as an alternative remediation technique to restore the cadmium-contaminated soil. In addition, some local products produced from the fibers of the hemp grown in the contaminated areas can also improve the economic status of the community. As a consequence, the improvement of social well-being as well as the sustainable development of the community can be reached.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature .....

Academic Year: 2020

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงไปได้ หากขาดความกรุณา ความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.พันธวัศ สัมพันธ์พานิช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้มอบความรู้ และให้คำปรึกษา รวมถึงคำแนะนำต่าง ๆ ทั้งในด้านการศึกษา และด้านการดำเนินชีวิต ซึ่งทำให้ข้าพเจ้าสามารถฝ่าฟันอุปสรรค และพัฒนาตนเองจนสามารถบรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้ และทำเล่มวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ได้ในที่สุด

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ และขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ตุลวิทย์ สถาปนจารุ ที่ได้กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษา รวมถึงข้อเสนอแนะ อันเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ข้าพเจ้า สามารถนำมาปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจาก โครงการ “การปรับปรุงและพัฒนาวัตกรรมการผลิตภัณฑจากเฮมพ์ที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียม อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก” และขอขอบคุณสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อำนวยความสะดวก และสนับสนุนในด้านเครื่องมือรวมถึงอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ อันเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณครอบครัว (คุณศรัทษพงษ์ อธิธรรมรัตนา และ วงศ์ไพบุลย์) ที่ได้สนับสนุนข้าพเจ้าในทุก ๆ ด้าน และคอยให้กำลังใจ พร้อมอยู่เคียงข้างข้าพเจ้าเสมอมา ซึ่งเป็นกำลังใจและแรงผลักดันสำคัญที่ทำให้ข้าพเจ้าสามารถประสบความสำเร็จในการศึกษาครั้งนี้ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อชิรญาณันท์ คุณศรัทษพงษ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แคดเมียม (Cadmium; Cd).....	5
2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียม .....	5
2.1.2 แหล่งที่มาของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม .....	6
2.1.3 ความเป็นพิษของแคดเมียม.....	7
2.1.4 ปฏิกิริยาเคมีของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม.....	8
2.2 สารคีเลต (Chelating Agent).....	8
2.2.1 ประเภทของสารคีเลต .....	9
2.2.2 สารคีเลตต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อน .....	9

2.2.3 สารคีเลตต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมแคดเมียมในพืช .....	10
2.2.4 ปัจจัยในการเลือกใช้สารคีเลต .....	11
2.2.5 สารอีดีทีเอ (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid; EDTA) .....	11
2.3 การบำบัดสารพิษด้วยพืช (Phytoremediation) .....	14
2.3.1 ประเภทของการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช .....	15
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักด้วยพืช .....	19
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่และการสะสมทางชีวภาพของโลหะหนัก.....	20
2.3.4 ข้อดีและข้อจำกัดการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช .....	21
2.4 เฮมพ์หรือกัญชง ( <i>Cannabis sativa</i> subsp. <i>sativa</i> L.).....	22
2.4.1 ประวัติการปลูกเฮมพ์ในประเทศไทย .....	22
2.4.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ .....	23
2.4.3 การขยายพันธุ์.....	24
2.4.4 องค์ประกอบสำคัญของเฮมพ์ .....	28
2.4.5 การใช้เฮมพ์ในการฟื้นฟูบำบัดดิน .....	29
2.5 การทดสอบความเป็นพิษของพืช .....	31
2.6 แสงซินโครตรอน (Synchrotron Light).....	34
2.6.1 ประโยชน์ของแสงซินโครตรอน .....	35
2.6.2 การผลิตแสงซินโครตรอน.....	36
2.6.3 ระบบลำแสง BL6b: Micro-XRF (Micro-X-ray Fluorescence) .....	38
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	41
2.7.1 งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้พืชในการดูดซับและสะสมโลหะหนัก.....	41
2.7.2 งานวิจัยด้านการศึกษาสารคีเลตในการบำบัดโลหะหนักด้วยพืช .....	42
2.7.3 งานวิจัยประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนในการบำบัดโลหะหนัก .....	43
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	45



3.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	45
3.2 สถานที่ทำการทดลอง .....	45
3.3 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย .....	45
3.3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการเพาะปลูกเหมพ์ .....	45
3.3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างดินและพืช .....	46
3.3.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ .....	46
3.3.4 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ .....	46
3.3.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง .....	47
3.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย .....	47
3.4.1 การเตรียมดินทดลอง .....	47
3.4.2 การเตรียมพืชทดลอง .....	47
3.4.3 การเตรียมสารเคมี .....	48
3.4.4 การเตรียมชุดการทดลอง .....	48
3.4.5 ระยะเวลาทำการทดลอง .....	48
3.4.6 บันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต (RGR) .....	48
3.4.7 การเก็บตัวอย่างดินและพืช .....	49
3.4.8 การวิเคราะห์ตัวอย่าง .....	49
3.4.9 การวิเคราะห์สารเสพติด (THC) .....	50
3.4.10 การวิเคราะห์และทดสอบความเป็นพิษของพืช .....	51
3.4.11 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแสงซินโครตรอน .....	52
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ .....	53
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	54
4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของดินทดลอง .....	54
4.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของชุดดินที่ 1 .....	55

4.1.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของชุดดินที่ 2 .....	56
4.2 ลักษณะทางเคมีของดินตัวอย่างภายหลังทำการทดลอง .....	57
4.2.1 ความเป็นกรด-ต่างของดิน (Potential of Hydrogen ion; pH).....	57
4.2.2 การนำไฟฟ้าของดิน (Electrical Conductivity; EC).....	59
4.2.3 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential; ORP).....	60
4.2.4 ผลของสารอินทรีย์ที่เอื้อต่อการสะสมแคดเมียมในดินทดลอง.....	61
4.3 ผลของสารอินทรีย์ที่เอื้อต่อการดูดซับและสะสมแคดเมียมในเฮมพ์ .....	63
4.3.1 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในราก.....	63
4.3.2 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในลำต้น (แกน).....	65
4.3.3 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบเปลือก (เส้นใย) .....	66
4.3.4 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบ .....	67
4.4 ผลของสารอินทรีย์ที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของเฮมพ์.....	69
4.4.1 ผลของสารอินทรีย์ที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนต่าง ๆ ของเฮมพ์.....	69
4.4.2 ผลของสารอินทรีย์ที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงของเฮมพ์ .....	73
4.4.3 การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate; RGR) .....	74
4.5 การวิเคราะห์ปริมาณสารเตตราไฮโดรแคนนาบินอล (Tetrahydrocannabinol, THC) .....	75
4.5.1 ชุดตรวจวัดปริมาณที่เอชซีภาคสนาม (THC test kit).....	75
4.5.2 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารเตตราไฮโดรแคนนาบินอล (Tetrahydrocannabinol, THC) ทางห้องปฏิบัติการของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข .....	76
4.6 การวิเคราะห์และทดสอบความเป็นพิษของเฮมพ์ .....	76
4.7 สมดุลมวล (Mass Balance).....	78
4.8 การวิเคราะห์การกระจายตัวของแคดเมียมในเฮมพ์ด้วยแสงซินโครตรอน .....	79
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	84
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	84

5.1.1 ผลของสารอีทีทีเอต่อความสามารถในการดูดตั้งแคดเมียมในดินด้วยเฮมพ์ .....	84
5.1.2 การศึกษาการกระจายตัวของแคดเมียมในเฮมพ์ด้วยเทคนิคแสงซินโครตรอน.....	85
5.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารเตตราไฮโดรแคนนาบินอลในใบเฮมพ์ .....	85
5.1.4 การประเมินความเป็นพิษและความเสี่ยงจากผลิตภัณฑ์.....	85
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	86
บรรณานุกรม.....	87
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก สถานที่ทำการทดลองและชุดการทดลอง.....	98
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินและพืชทดลอง.....	103
ภาคผนวก ค ข้อมูลทางสถิติ .....	109
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ปริมาณสารเตตราไฮโดรแคนนาบินอล .....	124
ภาคผนวก จ การวิเคราะห์และทดสอบความเป็นพิษของเฮมพ์.....	125
ประวัติผู้เขียน.....	129

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแคดเมียม .....	6
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของสารอีทีทีเอ.....	12
ตารางที่ 2.3 ค่าแสดงความเป็นพิษของแคดเมียม และสารประกอบต่าง ๆ .....	32
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในดิน จากการสำรวจแปลงนาของเกษตรกร ครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 .....	55
ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของดินทดลอง.....	56
ตารางที่ 4.3 ปริมาณแคดเมียมในส่วนเปลือก (เส้นใย) และแกนของเฮมพ์ในการทำผลิตภัณฑ์.....	77
ตารางที่ 4.4 สมดุลมวล (Mass balance) ของการดูดซับและสะสมแคดเมียมด้วยเฮมพ์ที่ปลูกในดินปนเปื้อน ที่ระยะเวลา 120 วัน (สิ้นสุดการทดลอง) .....	81

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขอบเขตการศึกษา .....	4
รูปที่ 2.1 โครงสร้างสารอีทีทีเอ และโครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะกับสารอีทีทีเอ.....	12
รูปที่ 2.2 กระบวนการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช .....	15
รูปที่ 2.3 ประเภทของการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช (ก) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (ข) การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช (ค) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (ง) การย่อยสลายสารมลพิษ ด้วยพืช (จ) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช และ (ฉ) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2558).....	16
รูปที่ 2.4 ประเภทของการสกัดสารมลพิษ (Phytoextraction).....	17
รูปที่ 2.5 ความแตกต่างทางลักษณะกายภาพระหว่างเฮมพ์และกัญชา .....	25
รูปที่ 2.6 กระบวนการเก็บเกี่ยวเฮมพ์ และการลอกเปลือกเฮมพ์ (ก) การเก็บเกี่ยวเฮมพ์ (ข) การแยกเปลือกเฮมพ์ด้วยมือ และ (ค) การแยกเปลือกเฮมพ์ด้วยเครื่องจักร.....	26
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มคานนาบินอยด์ (Cannabinoids).....	29
รูปที่ 2.8 เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน.....	37
รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดการเรืองรังสีเอกซ์ .....	39
รูปที่ 2.10 แผนผังของระบบลำเลียงแสงที่ 6 สำหรับเทคนิค micro-XRF .....	39
รูปที่ 2.11 แสดงความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบลำเลียงแสงที่ 6 .....	40
รูปที่ 2.12 สถานีทดลอง micro-XRF ของห้องปฏิบัติการแสงสยาม .....	41
รูปที่ 4.1 ความเป็นกรด-ด่างของดินทดลอง .....	59
รูปที่ 4.2 ค่าการนำไฟฟ้าของดินทดลอง .....	60
รูปที่ 4.3 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินทดลอง .....	61
รูปที่ 4.4 ผลของสารอีทีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในดินทดลอง .....	63
รูปที่ 4.5 ผลของสารอีทีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในรากเฮมพ์ .....	65

รูปที่ 4.6 ผลของสารอีดีทีที่เอต่อการสะสมแคดเมียมในลำต้นเฮมพ์ .....	66
รูปที่ 4.7 ผลของสารอีดีทีที่เอต่อการสะสมแคดเมียมในเปลือก (เส้นใย) เฮมพ์ .....	67
รูปที่ 4.8 ผลของสารอีดีทีที่เอต่อการสะสมแคดเมียมในใบเฮมพ์ .....	68
รูปที่ 4.9 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนรากของเฮมพ์ .....	70
รูปที่ 4.10 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนลำต้นของเฮมพ์ .....	71
รูปที่ 4.11 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใบของเฮมพ์ .....	72
รูปที่ 4.12 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์ .....	73
รูปที่ 4.13 ผลของสารอีดีทีที่เอต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงของเฮมพ์ .....	74
รูปที่ 4.14 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของเฮมพ์ .....	75
รูปที่ 4.15 การเคลื่อนที่และการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ในส่วนลำต้น (แกน) เฮมพ์ ด้วยระบบ ลำเลียงแสงซินโครตรอน เทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (SR-XRF) ก) ภาพตัดขวางส่วนลำต้น (แกน) ข) แคลเซียม (Ca) ค) คลอไรด์ (Cl) ง) เหล็ก (Fe) จ) โพแทสเซียม (K) ฉ) ฟอสฟอรัส (P) ช) ซัลเฟอร์ (Sulfur) และ ซ) ซิลิคอน (Si) ในเฮมพ์ .....	82
รูปที่ 4.16 การเคลื่อนที่และการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ในส่วนเปลือก (เส้นใย) เฮมพ์ ด้วยระบบ ลำเลียงแสงซินโครตรอน เทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (SR-XRF) ก) ภาพตัดขวางส่วน เปลือก (เส้นใย) ข) แคลเซียม (Ca) ค) คลอไรด์ (Cl) ง) เหล็ก (Fe) จ) โพแทสเซียม (K) ฉ) ฟอสฟอรัส (P) ช) ซัลเฟอร์ (Sulfur) และ ซ) ซิลิคอน (Si) ในเฮมพ์ .....	83

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การพัฒนาของเทคโนโลยีและการขยายตัวของอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่นับวันจะทวีความรุนแรงขึ้น ทรัพยากรดินเป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่สำคัญ เนื่องจากดินเป็นแหล่งของปัจจัยสี่ และดินยังเป็นตัวกลางทางสิ่งแวดล้อม เมื่อดินเกิดความเป็นพิษจะแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร โดยเฉพาะความเป็นพิษจากโลหะหนักที่สามารถสะสมภายในอวัยวะ และก่อให้เกิดโรคร้ายในสิ่งมีชีวิตได้ (Gavrilescu, 2004) สถาบันจัดการทรัพยากรน้ำนานาชาติ (International Water Management Institute; IWMI) ร่วมกับกรมวิชาการเกษตร (Department of Agriculture; DOA) ได้ทำการสำรวจพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมในดินและผลผลิตทางการเกษตร ในตำบลพระธาตุผาแดง ตำบลแม่กุ และตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ภายใต้โครงการ IWMI-DOA Collaborative Project ระหว่างปี 2541-2546 ผลการศึกษาพบว่า มีปริมาณแคดเมียมในดินแปลงนา เท่ากับ 3.4-284 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานของกลุ่มประชาคมยุโรป (European Community; EC) กำหนดไว้ไม่เกิน 3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดิน ที่ใช้เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (2547) ที่กำหนดให้มีค่าแคดเมียมปนเปื้อนไม่เกิน 37 มิลลิกรัม/กิโลกรัม นอกจากนี้ 90 เปอร์เซ็นต์ ของข้าวที่สุ่มตรวจ ยังมีปริมาณแคดเมียมสะสม เท่ากับ 0.1-4.4 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงเดียวกันกับข้าวที่ก่อให้เกิดโรคอิตา-อิตา ในประเทศญี่ปุ่น โดยค่ามาตรฐานของแคดเมียมในข้าวที่ได้มีการกำหนดไว้ คือ ต้องไม่เกินหรือเท่ากับ 0.4 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Codex, 2006) ซึ่งอันตรายจากพิษของแคดเมียม สามารถก่อให้เกิดโรคอิตา-อิตา ผู้ป่วยจะมีกระดูกพรุน กระดูกโก่งเสียรูปทรง และแตกหักได้ จึงจำเป็นต้องหาวิธีการบำบัดและฟื้นฟูดินปนเปื้อนแคดเมียม เพื่อลดโอกาสการได้รับสารพิษของประชากรในพื้นที่ปนเปื้อน

เทคนิคการฟื้นฟูดิน (Soil Remediation) มีวัตถุประสงค์คือ ต้องการป้องกัน ยับยั้งหรือกำจัดสารมลพิษในสิ่งแวดล้อมให้ลดลงหรือหมดไปจากพื้นที่ ซึ่งในการศึกษานี้เลือกที่จะทำการฟื้นฟูดิน โดยการใช้พืชบำบัดสารมลพิษ (Phytoremediation) เป็นการใช้กลไกการทำงานของพืชในการเคลื่อนย้าย กักเก็บ หรือทำให้สารมลพิษในสิ่งแวดล้อมที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตลดลง ซึ่งเป็นวิธีการที่เรียบง่าย สะดวก ประหยัดค่าใช้จ่าย และมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558) โดยพืชที่สามารถนำมาใช้ในการบำบัดพื้นที่ จะต้องเป็นพืชที่ปลูกง่ายโตเร็ว โตได้ดีในทุกสภาพแวดล้อม มีความคงทนต่อสารมลพิษสูง และที่สำคัญคือ ต้องไม่ใช่พืชที่เป็นอาหารในการบำบัด

(Cultivation of Non-food Crop) เช่น ยูคาลิปตัส ดาวเรือง และอ้อย เป็นต้น (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2549) สำหรับเทคโนโลยีในการบำบัดด้วยพืชที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ การใช้พืชดูดดึงและสะสมโลหะหนักไว้ในส่วนรากและลำเลียงขึ้นไปสะสมในลำต้นและใบ (Schnoor, 1997) โดยพืชที่เลือกใช้ในการศึกษาคั้งนี้คือ เฮมพ์ (Hemp) สายพันธุ์ *Cannabis sativa* subsp. *Sativa* L. เพราะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ฟื้นฟูดินคือ ปลูกง่าย โตเร็ว ง่ายต่อการดูแลรักษา โรคแมลงเข้าทำลายน้อย และเฮมพ์ยังเป็นพืชล้มลุก มีอายุเพียงปีเดียว มีระบบรากแก้วและรากแขนง ดังนั้นจึงได้นำมาทำการศึกษาศรีทธิภาพของการดูดดึงแคดเมียม ร่วมกับการเติมสารคีเลตคือ สารอีดีทีเอ ลงในดินที่ปนเปื้อนที่ขุดมาจาก ตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งผลการศึกษาคั้งนี้ จะนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่เกษตรกรรมที่ปนเปื้อนแคดเมียมรวมถึงพื้นที่อื่น ๆ ที่มีการปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้สารอีดีทีเอ และปริมาณการดูดดึงและสะสมแคดเมียมในดินและส่วนต่าง ๆ ของเฮมพ์

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารเสพติด (THC) และทดสอบความเป็นพิษของเฮมพ์ในการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

การใช้สารอีดีทีเอจะสามารถช่วยให้เฮมพ์มีการดูดดึง และการกระจายตัวของแคดเมียมไปไว้ในส่วนเหนือดิน (ลำต้นและใบ) มากกว่าส่วนใต้ดิน (ราก) และผลผลิตที่จะนำไปแปรรูปไม่มีความเป็นพิษต่อผู้บริโภค

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาคั้งนี้ เป็นการศึกษาผลของการปลูกเฮมพ์ร่วมกับการเติมสารคีเลตคือ สารอีดีทีเอ เพื่อศึกษาการสะสมและดูดดึงแคดเมียมในดินที่ปนเปื้อนของพื้นที่เกษตรกร อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก สำหรับขอบเขตการศึกษาคั้งนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

1.4.1 ดินปนเปื้อนแคดเมียม (ระดับความเข้มข้น 37.68 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) และดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม (ระดับความเข้มข้น 0.56 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) ขุดมาจากแปลงนาของเกษตรกร ตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และนำมาทำการทดลองที่โรงเรือนทดลองชั้น 2 อาคารสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



1.4.2 พืชที่ใช้ในการศึกษาคือ เฮมพ์ (*Cannabis sativa* L.) โดยเมล็ดพันธุ์ได้รับอนุญาตจากกระทรวงสาธารณสุข โดยซื้อมาจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (สวพส.) และทำการเพาะปลูกพืชด้วยเมล็ดในโรงเรือนทดลอง

1.4.3 สารคีเลตที่ใช้คือ เอทิลีนไดเอมีนเตตระแอซีตริกแอซีต (Ethylene Diamine Tetraacetic; EDTA) สัดส่วนระหว่างดินต่อสารอีดีทีเอ ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ 1:1 และ 1:2

1.4.4 ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองคือ 4 เดือน โดยทำการเก็บตัวอย่างดินและพืช ทุกๆ 30, 60, 90 และ 120 วัน

1.4.5 ตัวอย่างพืชทดลอง จะทำการวิเคราะห์เฉพาะส่วน ได้แก่ ราก เปลือก แกน และ ใบ

1.4.6 บันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต (RGR) การวิเคราะห์ปริมาณสารเสพติด (THC) และการทดสอบความเป็นพิษของพืช (Phytotoxicity)

1.4.7 นำตัวอย่างดินและพืชมาวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดด้วยเครื่องอินดักทีฟพลาสมาสเปกโตรเมทรี (Inductively Coupled Plasma Spectrometer; ICPS)

1.4.8 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ โดยวิเคราะห์การสะสม การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของแคดเมียมในเฮมพ์ ด้วยเทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (Micro-X-ray fluorescence)

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถนำผลการทดลองไปใช้เป็นแนวทางในการลดปริมาณ และการกระจายตัวของโลหะหนักเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารและสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ปนเปื้อนจริงได้

1.5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยพืชเศรษฐกิจ สู่การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชุมชนเพื่อสร้างอาชีพและรายได้



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขอบเขตการศึกษา

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แคดเมียม (Cadmium; Cd)

แคดเมียมถูกค้นพบครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1817 โดยนักเคมีชาวเยอรมัน นามว่า Friedrich Strohmayer โดยค้นพบธาตุแคดเมียมปนเปื้อนมากับแร่สมิธโซไนต์ (Smithsonite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีชนิดหนึ่ง แคดเมียมเป็นธาตุเคมีที่มีหมายเลขอะตอม 48 จัดอยู่ในกลุ่ม IIB ของตารางธาตุ ซึ่งแคดเมียมจัดเป็นหนึ่งในธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกโลก โดยมีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร (Van der Perk, 2006) ซึ่งแร่ที่ค้นพบแคดเมียมปนเปื้อนมากที่สุดคือ แร่กรีนอคไคต์ (Greenockite) โดยสินแร่แคดเมียมจะอยู่ร่วมกับสินแร่สังกะสีในรูปของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) จึงทำให้แคดเมียมเป็นผลพลอยได้ของกิจกรรมการทำเหมืองแร่และการถลุงแร่สังกะสี (Pendias, 2000) นอกจากนี้แคดเมียมและสังกะสีมีโครงสร้างไอออน (Ionic Structure) และค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity; EN) ที่ใกล้เคียงกัน

##### 2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแคดเมียม

แคดเมียมเป็นโลหะทรานซิชันสีเงินแกมขาว มีความอ่อนตัวง่ายต่อการตัดโค้ง จัดอยู่ในกลุ่ม IIB มีเลขอะตอมเท่ากับ 48 จัดอยู่ในหมู่ 12 คาบ 5 ของตารางธาตุ โดยแสดงคุณสมบัติแคดเมียมได้ดังตารางที่ 2.1 แคดเมียมเป็นวัตถุไวไฟ ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ดีในสภาวะกรด หรือถูกทำละลายด้วยกรดไนตริก ( $H_2NO_3$ ) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) เป็นต้น โดยทั่วไปมักพบแคดเมียมในรูปสารประกอบเกลือ และร่วมกับสารอื่นเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ คือไซยาไนด์ (Cyanides) กับ เอมีน (Amines) (Sharma et al., 2015) นอกจากนี้แคดเมียมมักถูกออกซิไดซ์และเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของแคดเมียมออกไซด์ (CdO) ในอากาศ (Adriano, 2001)

แคดเมียมเป็นผลพลอยได้จากการถลุงแร่สังกะสี ด้วยคุณสมบัติที่คงทนต่อการกัดกร่อน จึงนิยมใช้เป็นตัวเคลือบผิวโลหะชนิดต่าง ๆ นอกจากนี้หากนำแคดเมียมผสมกับโลหะบางชนิด จะทำให้โลหะดังกล่าวมีจุดหลอมเหลวต่ำลง จึงทำให้แคดเมียมถูกประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่นิกเกิล (NiCd) อุตสาหกรรมทำสี อุตสาหกรรมพลาสติก และอุตสาหกรรมผลิตอัลลอยด์ เป็นต้น (Borsari, 2014)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแคดเมียม

คุณสมบัติ	รายละเอียด
สูตรทางเคมี	Cd
มวลอะตอม	112.4 กรัมต่อโมล
โครงสร้างผลึก	เฮกซะโกนอล (Hexagonal)
ความหนาแน่น	8.65 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
จุดหลอมเหลว	321 ° C (610 ° F หรือ 594 K )
จุดเดือด	765 ° C (1410 ° F หรือ 1040 K)
ค่าการละลาย ที่ 20 °C	0.04 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร
CAS NO.	7440439

ที่มา: ดัดแปลงจาก (Adriano 2001; Hooser, 2007; Sharma et al., 2015)

### 2.1.2 แหล่งที่มาของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่พบได้ตามธรรมชาติ มีการกระจายตัวตามแผ่นเปลือกโลก โดยมีความเข้มข้นประมาณ 0.15-0.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Sharma et al., 2015) มักพบแคดเมียมอยู่ร่วมกับแร่สังกะสีในปริมาณ ร้อยละ 0.1-5 ซึ่งปริมาณของแคดเมียมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของแร่สังกะสี กล่าวคือ หากพบแร่สังกะสีในปริมาณสูงจะพบปริมาณของแคดเมียมสูงด้วยเช่นกัน ซึ่งแร่สังกะสีในประเทศไทยที่ขุดได้จากจังหวัดตาก จะมีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบอยู่ ร้อยละ 0.23-0.38 (พนัส พงศ์ผลาดิษฐ์, 2553) และในบรรยากาศบริเวณพื้นที่ห่างไกลแหล่งอุตสาหกรรม พบว่า มีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่า 0.01 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับในแหล่งชุมชนมีปริมาณแคดเมียมในบรรยากาศต่ำกว่า 0.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และในบริเวณพื้นที่ที่มีการทำเหมืองแร่สังกะสี พบว่า มีปริมาณแคดเมียมในบรรยากาศสูงกว่า 0.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

แคดเมียมสามารถถูกปลดปล่อยผ่านตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมได้ โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อปริมาณแคดเมียมในดินนั้น มาจากการผุพังของหินอัคนีหรือหินด่างกำเนิด ซึ่งหินอัคนีสีเข้มจะมีปริมาณแคดเมียมมากกว่าหินอัคนีสีจาง (Ross, 1994) นอกจากนี้กิจกรรมของมนุษย์ยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่กระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยแคดเมียมออกสู่ตัวกลางทางสิ่งแวดล้อม เช่น การถลุงแร่โลหะ การทำอุตสาหกรรมพลาสติก และไมโครอิเล็กทรอนิกส์ การใช้ปุ๋ยในการทำเกษตรกรรม และการกำจัดของเสียอย่างไม่ถูกวิธี เมื่อแคดเมียมแพร่กระจายและปนเปื้อนในตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน แคดเมียมจะยึดเกาะกับอนุภาคดิน หรือบางส่วนจะยังคงอยู่ในรูปที่ละลายน้ำ ซึ่งง่ายต่อการถูกดูดซับ

เคลื่อนย้าย และลำเลียงผ่านรากไปกักเก็บไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืช (Adriano, 2001; Raskin and Ensley, 2000) หรือถูกชะลงสู่หน้าดิน

### 2.1.3 ความเป็นพิษของแคดเมียม

แคดเมียมเป็นโลหะที่มีความเป็นพิษ สารประกอบแคดเมียมสามารถเคลื่อนย้ายจากดินเข้าสู่รากพืชหรือเกิดการชะล้างลงสู่หน้าดินได้ แต่ความสามารถในการเคลื่อนที่ของแคดเมียมยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณของสารอินทรีย์ เป็นต้น ดังนั้นการทำเกษตรกรรมบนดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม ผลผลิตที่ได้จะมีการสะสมแคดเมียมแล้วเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร โดยเมื่อมีการบริโภคผลผลิตที่ผ่านการปลูกบนดินปนเปื้อนแคดเมียม ร่างกายจะมีการสะสมแคดเมียมเป็นลำดับต่อไป โดยเมื่อแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจะเคลื่อนย้ายไปสะสมยังตับและไต จากการศึกษาของสำนักทะเบียนการติดเชื้อและสารเป็นพิษ (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012) ระบุว่า การได้รับสารแคดเมียมในปริมาณน้อย ร่างกายจะสามารถเปลี่ยนแคดเมียมให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นอันตรายได้แต่ในทางตรงกันข้าม หากร่างกายมีการสะสมแคดเมียมในปริมาณที่มากเกินไป จะส่งผลให้มีการลดประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปของแคดเมียมที่เป็นพิษลง โดยความเป็นพิษของแคดเมียม สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

#### 1) ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน

โดยความเป็นพิษแบบเฉียบพลันของแคดเมียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1.1) ความเป็นพิษของแคดเมียมต่อระบบทางเดินอาหาร ผู้ป่วยจะรู้สึกคลื่นไส้อาเจียนอย่างรุนแรง ท้องร่วง เป็นตะคริว จนอาจนำไปสู่สภาวะไตล้มเหลวเฉียบพลันได้

1.2) ความเป็นพิษต่อระบบหายใจ ผู้ป่วยจะเกิดการระคายเคืองที่หลอดลม ปอด จมูก รวมถึงมีอาการไอและวิงเวียนศีรษะ อ่อนเพลีย มีไข้ เจ็บหน้าอก เป็นต้น

#### 2) ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง

เมื่อร่างกายได้รับพิษของแคดเมียมจะก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ เช่น โรคตับ โรคกระดูกพรุน และยังส่งผลต่อระบบประสาท นอกจากนี้ยังพบว่า ผู้ที่สูบบุหรี่จะยิ่งเพิ่มโอกาสการได้รับสารพิษจากแคดเมียม ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ (Satarug et al., 2003) ที่ระบุว่า ผู้สูบบุหรี่มีโอกาสได้รับพิษจากแคดเมียมเป็น 2 เท่า ของคนที่ไม่ได้สัมผัสแคดเมียม และการขับสารแคดเมียมให้ออกจากร่างกายนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากค่าครึ่งชีวิตของแคดเมียมมีค่าประมาณ 10-30 ปี (World Health Organization (WHO), 1992) และจากรายงานของ (Aoshima, 2016) กล่าวว่า หลังเกิดโรคอิไต-อิไตครั้งแรกที่แม่น้ำจินซู จังหวัดโทยามะ ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ.2511 ทางหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้ลงสำรวจพื้นที่ดินบริเวณแม่น้ำจินซูเป็นพื้นที่ขนาด 31.3 ตารางกิโลเมตร ผลการวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณแคดเมียมปนเปื้อนในดิน อยู่ในช่วง 0.21-9.54 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และพบปริมาณแคดเมียม

สะสมในข้าว อยู่ในช่วง 0.00-5.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จึงได้ดำเนินการแก้ไขด้วยการนำดินไม่ปนเปื้อนมาแทนที่ดินปนเปื้อนแคดเมียม โดยโครงการนี้ได้สำเร็จในปี พ.ศ. 2555 ภายหลังได้มีการเก็บตัวอย่างข้าวมาวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียม พบว่า ปริมาณแคดเมียมลดลง แต่อย่างไรก็ตามกลุ่มผู้ป่วยที่มีปัญหาเกี่ยวกับระบบท่อไต ไม่สามารถรักษาได้ และยังคงเกิดผู้ป่วยโรคไต-อิตราวยใหม่ขึ้น ดังนั้นการตรวจสอบระยะเวลาของผู้ป่วย รวมทั้งผู้ที่อาศัยบริเวณที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมในธรรมชาติ จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรดำเนินการอย่างต่อเนื่อง และการตรวจสอบผลผลิตทางการเกษตรที่ปลูกบนพื้นที่ปนเปื้อนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาการสัมผัสแคดเมียมเรื้อรัง องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้มีการกำหนดให้ในหนึ่งวันสามารถบริโภคแคดเมียมได้ไม่เกิน 0.025 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (World Health Organization (WHO), 2011) และสำหรับประเทศไทยมีการกำหนดค่าเกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนแคดเมียม คือ บริเวณดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม ต้องมีปริมาณแคดเมียมไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และสำหรับดินที่ใช้ประโยชน์อื่นนอกเหนือจากการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม อนุญาตให้มีการปนเปื้อนแคดเมียมได้ไม่เกิน 810 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25, 2547)

#### 2.1.4 ปฏิกริยาเคมีของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

แคดเมียมสามารถเข้าสู่ตัวกลางทางสิ่งแวดล้อม (ดิน น้ำ และอากาศ) ได้จากการพุ้งของหินต้นกำเนิด รวมถึงกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ การทำอุตสาหกรรมเหมือง การใช้ปุ๋ยฟอสเฟต การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล และการกำจัดของเสียอย่างไม่ถูกวิธี เป็นต้น แคดเมียมสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางได้หลายรูปแบบ แต่โดยทั่วไปตามธรรมชาติมักพบแคดเมียมในรูปของแคดเมียมไดวาเลนต์ (Cadmium Divalent;  $Cd^{2+}$ ) ทั้งนี้ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปฟอร์มและการเคลื่อนที่ของแคดเมียม ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และเนื้อดิน เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปแคดเมียมจะถูกดูดซับกับอินทรีย์วัตถุ ทำให้ยากต่อการเคลื่อนที่ในดิน กล่าวคือ แคดเมียมสามารถจับกับสารหรือไอออนต่าง ๆ ในตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมได้ดีแตกต่างกัน เช่น กรดฮิวมิก (Humic Acid) > คาร์บอเนตไอออน ( $CO_3^{2-}$ ) > ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) > คลอไรด์ไอออน ( $Cl^-$ ) > ซัลเฟตไอออน ( $SO_4^{2-}$ ) เป็นต้น

## 2.2 สารคีเลต (Chelating Agent)

สารคีเลต เป็นคำจากภาษากรีกมีความหมายว่า “กรงเล็บ” (Claw) เมื่อพิจารณาจากรากศัพท์สามารถอธิบายได้ว่า สารคีเลตแต่ละชนิดมีแนวโน้มที่จะจับยึดกับแคดไอออนต่าง ๆ โดยที่ไม่ยอมให้แคดไอออนเหล่านั้นไปทำปฏิกิริยากับสารอื่น จึงสามารถกล่าวได้ว่า สารคีเลตคือ สารที่จะรวมและป้องกันไม่ให้เกิดการตกตะกอนของพวกแคดไอออนบางชนิด รวมถึงจุลธาตุอาหาร ได้แก่ เหล็ก

แมงกานีส ทองแดง และสังกะสี อีกด้วย โดยสารคีเลตจะมีทั้งสารคีเลตอินทรีย์และสารคีเลตอนินทรีย์ มีปฏิกิริยาการรวมตัวกับโลหะที่เรียกว่า Chelation ภายหลังเสร็จสิ้นปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็น สารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) หรือสารประกอบโคออดิเนชัน (Coordination Compound) ส่งผลให้ประจุบวกที่ถูกล้อมรอบด้วยสารคีเลต จะคงอยู่ในสภาพละลายน้ำได้นาน จึงเป็นสารที่ง่ายต่อการดูดซับนำไปใช้ด้วยพืช (Speight, 2017)

ในปัจจุบันมีการสังเคราะห์สารคีเลตมาใช้มากมายหลายชนิด แต่สารคีเลตที่นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายนั้น ได้แก่ ไดเอทิลลีนไตรเอมีนเพนตะอะซิติกแอซิด (Diethylene Triamine Pentaacetic Acid; DTPA) และเอทิลลีนไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid; EDTA) เป็นต้น (Razuvaev et al., 1971)

### 2.2.1 ประเภทของสารคีเลต

สารคีเลตสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) สารคีเลตอินทรีย์ธรรมชาติ เช่น กรดฮิวมิก (Humic Acid; HA) กรดฟีโนลิก (Phenolic Acid; FA) กรดซิตริก (Citric Acid; CA) และกรดอะมิโน (Amino Acid; AA) เป็นต้น

2) สารคีเลตสังเคราะห์ เช่น เอทิลลีนไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid; EDTA) ไดเอทิลลีนไตรเอมีนเพนตะอะซิติกแอซิด (Diethylene triamine Pentaacetic Acid; DTPA) ไฮดรอกซิลเอทิลลีนไดเอมีนเตตระอะซิติกแอซิด (Hydroxyl Ethylene Diamine Tetraacetic Acid; HEDTA) และเอทิลลีนไดเอมีนไดไฮดรอกซิลฟีนิลแอซิด (Ethylene Diamine Dio-Hydroxyphenyl Acid; EDDHA) เป็นต้น

### 2.2.2 สารคีเลตต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดดินปนเปื้อน

โดยทั่วไปสารเคมีแต่ละชนิดไม่ว่าจะเป็นกรดแก่ เบส สารลดแรงตึงผิว หรือ สารคีเลต ล้วนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสกัดโลหะออกจากดินได้ แต่สารที่ได้รับความนิยมสูงสุดในการนำมาประยุกต์ใช้บำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนักคือ กรดแก่และสารคีเลต (Karthika et al., 2016) สำหรับกรดแก่ ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid) กรดซัลฟิวริก (Sulphuric Acid) และกรดไนตริก (Nitric Acid) เป็นต้น กรดแก่เหล่านี้จะสกัดโลหะออกจากดิน โดยเข้าทำลายโลหะไม่ให้เกาะติดกับตะกอนดิน ผิวน้ำดิน และรวมถึงแร่ธาตุในดิน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือ สามารถสกัดโลหะออกจากดินได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง แต่ข้อเสียในการสกัดโลหะด้วยกรดแก่คือ กรดจะเข้าทำลายแร่ธาตุและอินทรีย์วัตถุในดิน ส่งผลให้โครงสร้างดินถูกทำลาย และยิ่งเพิ่มความเป็นกรดในดิน (Neale et al., 1997; Reed et al., 1996) ซึ่งต่างจากการใช้สารคีเลตที่ก่อให้เกิดความเสียหายในดินน้อยกว่า เนื่องจากสารคีเลตจะสกัดโลหะออกจากดิน โดยจะจับยึดกับประจุบวกของโลหะแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ส่งผลให้โลหะหนักคงอยู่ในรูปของสารละลายได้

นาน อีกทั้งยังชะลอการตกตะกอนของโลหะหนัก ซึ่งง่ายต่อการชะล้างออกจากดินหรือถูกดูดดึงด้วยพืช

### 2.2.3 สารคีเลตต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมแคดเมียมในพืช

การบำบัดดินด้วยพืช (Phytoremediation) ถึงแม้จะเป็นเทคนิคฟื้นฟูดินที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ก็ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น พืชไม่สามารถกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ลึกกว่าบริเวณรากได้ พืชสามารถดูดดึงโลหะหนักในรูป Inorganic Salt ที่ละลายน้ำได้ดีกว่าการดูดดึงโลหะหนักในรูป Organic compound นอกจากนี้ความสามารถของดินในการดูดจับโลหะหนัก (Sorptions Capacity) ก็มีผลต่อการดูดดึงโลหะหนักของพืชเช่นกัน ซึ่งหากดินมีการดูดจับโลหะหนักอย่างแน่นหนา จะเป็นการยากต่อพืชในการดูดดึงนำไปใช้ จึงเป็นเหตุให้พืชดูดดึงโลหะในดินทรายได้ดีกว่าดินเหนียวเสมอ ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นศึกษาวิธีการเพิ่มปริมาณการสะสมโลหะหนักในพืช ทั้งนี้การเติมสารคีเลตถือเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดดึงโลหะหนักไปสะสมในพืช อีกทั้งการเติมสารคีเลตในปริมาณน้อยต่อการปลูกพืช ยังสามารถช่วยลดระดับความเป็นพิษของโลหะหนักในพืชลงได้ เช่น การใช้สารคีเลตสังเคราะห์ ได้แก่ อิติทีเอ และ ดีทีพีเอ (Evangelou et al., 2007b) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Sun et al. (2011) ที่ศึกษาผลของสารอิติทีเอต่อการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียมด้วย *Rorippa globose* ในการศึกษาได้ทำการเติมสารอิติทีเอที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 0.5 กรัมต่อกิโลกรัม และ 1 กรัมต่อกิโลกรัม โดยทำการเติมสารอิติทีเอในช่วงก่อนพืชออกดอก (22 วัน) ช่วงพืชออกดอก (38 วัน) และช่วงการเติบโตของพืชคงที่ (50 วัน) ผลการทดลองพบว่า การเติมสารอิติทีเอที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อกิโลกรัม ส่งผลให้พืชมีการสะสมแคดเมียมสูงกว่าการเติมสารอิติทีเอที่ความเข้มข้น 0.5 กรัมต่อกิโลกรัม และพบว่า พืชมีการสะสมแคดเมียมสูงสุดที่ไปในทุกช่วงการเติบโตของพืช จึงสรุปได้ว่า การเติมสารอิติทีเอในปริมาณที่สูงขึ้น จะส่งผลให้พืชสามารถดูดดึงโลหะได้สูงขึ้น อีกทั้งสารอิติทีเอมีส่วนช่วยเพิ่มการสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation) และเพิ่มการลำเลียงอาหาร (Translocation) ในพืช ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Santos et al. (2006) ที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารคีเลตที่แตกต่างกันคือ สารอิติทีเอ และสารอิติดีเอส ต่อการดูดดึงแคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว ด้วยพืช *Brachiaria decumbens* โดยผลการศึกษาพบว่า สารอิติทีเอมีส่วนช่วยลดความเป็นพิษจากแคดเมียม สังกะสี และตะกั่ว อีกทั้งยังพบว่า สารอิติทีเอ และสารอิติดีเอสส่งผลให้พืชเจริญเติบโตได้ดีในดินปนเปื้อน และมีอัตราการเพิ่มมวลชีวภาพสูงขึ้น เช่นเดียวกับ Abdel-Salam (2012) ที่ศึกษาผลของสารอิติทีเอ และสารดีทีพีเอ ต่อการกำจัดแคดเมียมในดินเหนียว และดินทราย ด้วยพืชที่แตกต่างกัน ได้แก่ หญ้าเนเปียร์ (Napier Grass) ต้นทานตะวัน (Sunflower) และข้าวฟ่าง (Millet) ผลจากการทดลองพบว่า หญ้าเนเปียร์มีประสิทธิภาพในการสะสม



แคดเมียมสูงสุด และการเติมสารคีเลตมีส่วนสำคัญในการเพิ่มปริมาณการสะสมแคดเมียมในพืช และลดระดับความเป็นพิษของแคดเมียมลงด้วย

#### 2.2.4 ปัจจัยในการเลือกใช้สารคีเลต

การนำสารคีเลตมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดโลหะหนักด้วยเทคนิคการฟื้นฟูดินต่าง ๆ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ควรคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ (Lee and Sung, 2014; Vulava and Seaman, 2000)

- 1) สารคีเลตต้องไม่ทำปฏิกิริยารุนแรงที่จะส่งผลเสียต่อองค์ประกอบและคุณสมบัติพื้นฐานดิน
- 2) สารคีเลตต้องเปลี่ยนสารพิษเป้าหมายให้อยู่ในรูปสารละลาย
- 3) สารคีเลตต้องมีความเป็นพิษต่ำ ไม่ก่อให้เกิดพิษทางสิ่งแวดล้อม และย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ
- 4) สารคีเลตควรเป็นสารที่ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียรสูง ในช่วงสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่กว้าง และมีอัตราส่วนโมลระหว่างโลหะหนักและลิแกนด์ ในอัตราส่วนเท่ากับ 1:1 โมล
- 5) สารคีเลตที่นำมาใช้ประโยชน์ ควรเป็นสารที่มีค่าครึ่งชีวิตสูง และเมื่อรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักแล้ว มีอัตราการสลายตัวที่ต่ำ

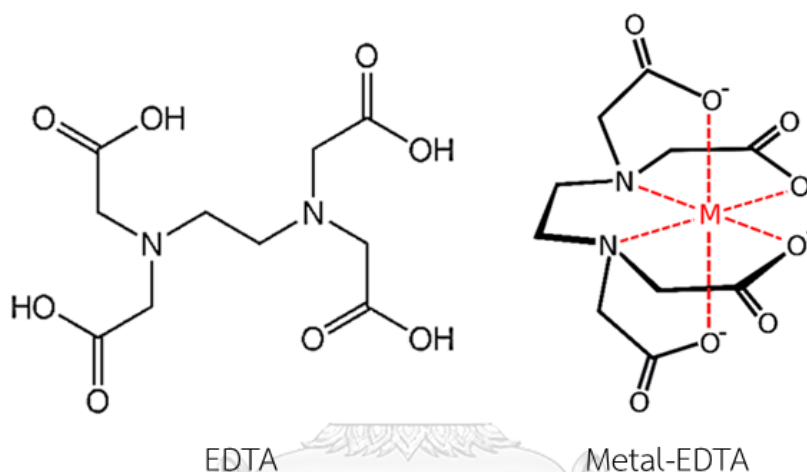
#### 2.2.5 สารอีดีทีเอ (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid; EDTA)

สารเอทิลีนไดเอมีนเตตระแอสिटริกแอซิด หรือเรียกอย่างย่อว่า สารอีดีทีเอ หรือกรดเอเดติก (Edeitic Acid) เป็นสารประกอบกรดอะมิโนโพลีคาร์บอกซิลิก (Amino Polycarboxylic Acid) ซึ่งเป็นสารคีเลตสังเคราะห์ที่มีลักษณะเป็นผงผลึกสีขาวละลายน้ำได้ โดยมีคุณสมบัติต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.2 ตามกฎของลิอิวิว สารอีดีทีเอนั้นมีประจุ 4- สามารถเกิดพันธะได้ 6 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.1 และประกอบด้วยกรดอะมิโน แบบตติยภูมิ จำนวน 2 กลุ่ม ซึ่งสามารถให้อิเล็กตรอน 6 คู่ กับประจุของโลหะ และเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับประจุบวก หรือล้อยอมประจุบวกของโลหะในอัตราส่วนโลหะต่ออีดีทีเอ 1:1 (Zhou et al., 2011) สารอีดีทีเอจะทำหน้าที่ป้องกันการตกตะกอนของธาตุประจุบวก โดยสารอีดีทีเอมากรวมกับโลหะหนักแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) จึงทำให้ประจุบวกของโลหะหนักคงอยู่ในรูปของสารละลายได้นาน (Razuvaev et al., 1971)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของสารอีดีทีเอ

คุณสมบัติ	รายละเอียด
สูตรทางเคมี	$C_{10}H_{16}N_2O_8$
มวลโมเลกุล	292.25 กรัมต่อโมล
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	2.5-3.0
ความหนาแน่น	0.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	240 °C

ที่มา: Crisponi and Nurchi (2016)



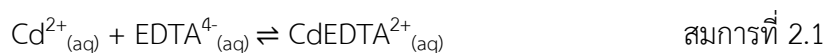
รูปที่ 2.1 โครงสร้างสารอีดีทีเอ และโครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะกับสารอีดีทีเอ

ที่มา: Burgot (2012)

สารอีดีทีเอเป็นสารคีเลตที่มักนิยมนำมาใช้ร่วมกับกระบวนการบำบัดดินปนเปื้อน (Karthika et al., 2016) โดยคุณสมบัติต่าง ๆ และประโยชน์ของสารอีดีทีเอ ได้แก่

- 1) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคดเมียมและสารอีดีทีเอ

สารอีดีทีเอถูกนำมาประยุกต์ใช้กำจัดแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม โดยอาศัยหลักการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนของโลหะและสารคีเลต ดังสมการที่ 2.1 โดยมีค่าคงที่สมดุลเคมี (Chemical Equilibrium Constant: K) เท่ากับ  $2.9 \times 10^{16}$  (เอกชา ตนานนท์ชัย, 2561a)



นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้ทดสอบการประยุกต์ใช้สารอีดีทีเอร่วมกับการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียมด้วยพืช เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของสารอีดีทีเอในการเปลี่ยนรูปฟอร์มของโลหะ

หนักให้อยู่ในรูปของสารละลาย ดังเช่น งานวิจัยของ Turan and Esringü (2007) ที่ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียมของพืชต่างชนิดกัน ได้แก่ Canola (*Brassica napus* L.) และ Indian Mustard (*Brassica juncea* L.) ร่วมกับการเติมสารอีดีทีเอในอัตราส่วนที่แตกต่างกันคือ 0, 3, 6 และ 12 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ผลการทดลองพบว่า สารอีดีทีเอช่วยเพิ่มปริมาณโลหะหนักให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ และเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในพืช โดยพืชที่ดูดซับแคดเมียมได้ดีที่สุดใน การทดลองครั้งนี้คือ Canola ซึ่งรากคือ ส่วนที่มีการสะสมโลหะสูงสุด ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Sun et al. (2011) ที่ศึกษาผลของสารอีดีทีเอต่อการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียมด้วย *Rorippa globose* ผลการศึกษาพบว่า การเติมสารอีดีทีเอที่มีปริมาณความเข้มข้นสูงขึ้น สามารถทำให้พืชดูดซับและสะสมแคดเมียมเพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่า สารอีดีทีเอมีส่วนช่วยเพิ่มการสะสมทางชีวภาพ (Bioaccumulation) และเพิ่มการลำเลียงอาหาร (Translocation) ในพืช

## 2) ประโยชน์ของสารอีดีทีเอ

### 2.1) ประโยชน์ของสารอีดีทีเอต่ออุตสาหกรรม

ในอุตสาหกรรมสารอีดีทีเอ ถูกนำมาใช้ในการลดความเสียหายจากการตกตะกอน และคราบตะกอนของไอออนในเครื่องจักร (Oviedo and Rodríguez, 2003) รวมถึงมีการประยุกต์ใช้สารอีดีทีเอในการถนอมอาหาร เนื่องจากในระหว่างกระบวนการผลิตอาจมีโลหะเจือปนในอาหารได้ ซึ่งเป็นผลทำให้อาหารเน่าเสียง่าย ดังนั้น การเติมสารอีดีทีเอจะรวมกับประจุของโลหะที่เจือปนในอาหาร ทำให้โลหะนั้นไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

### 2.2) ประโยชน์ของสารอีดีทีเอต่อทางการแพทย์

สารอีดีทีเอใช้เป็นยาฉีดยาโรคที่เกิดจากพิษของโลหะหนักอย่างตะกั่ว หรือในภาวะต่าง ๆ เช่น ภาวะแคลเซียมในเลือดสูง ภาวะหัวใจเต้นไม่สม่ำเสมอภายหลังใช้ยากลุ่มคาร์ดิแอก ไกลโคไซด์ (Cardiac Glycoside) เช่น ยาไดจอกซิน (Digoxin) เป็นต้น (Mendes et al., 2015)

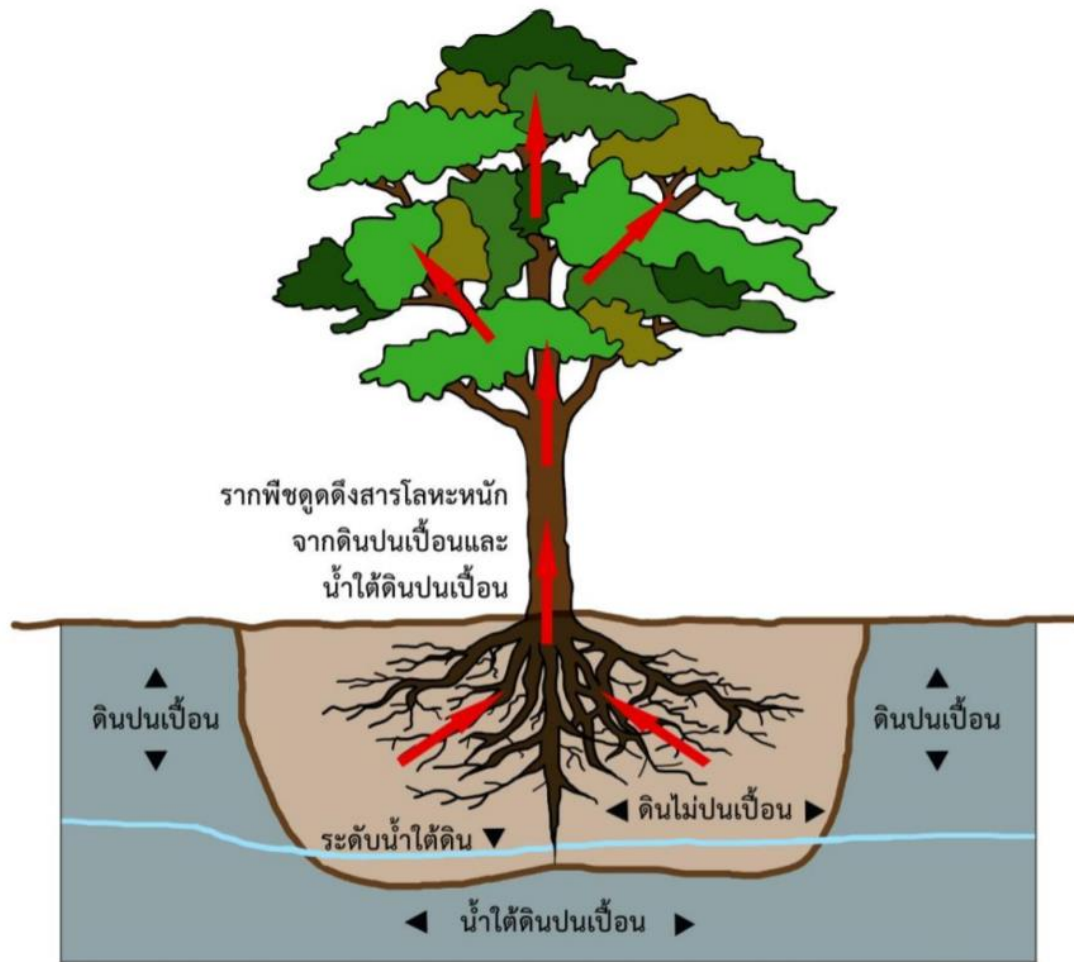
### 2.3) ประโยชน์ของสารอีดีทีเอต่อสิ่งแวดล้อม

สารอีดีทีเอนิยมถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดดินด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การล้างดิน (Soil Washing) หรือการบำบัดดินด้วยพืช (Phytoremediation) เป็นต้น Karthika et al. (2016) รายงานว่า สารอีดีทีเอเป็นสารคีเลตที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย อีกทั้งไม่มีพิษร้ายแรงต่อสุขภาพของมนุษย์ จากการทดลองของ Aselgzar and Gatea (2015) ได้ทดลองทำการล้างดินปนเปื้อนแคดเมียมร่วมกับการใช้สารอีดีทีเอ พบว่า สารอีดีทีเอมีส่วนเพิ่มประสิทธิภาพการชะล้างแคดเมียมออกจากดินมากถึง 97-100% นอกจากสารคีเลตแล้วยังมีปัจจัยอื่นที่มีอิทธิพลต่อการล้างดิน ได้แก่ เวลา อัตราเร็ว และอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ Gitipour et al. (2014) ที่ทำการทดลองล้างดินปนเปื้อนสารหนูร่วมกับการใช้สารคีเลตต่างกัน คือ สารอีดีทีเอ

และสารเอสดีเอส ผลการทดลองพบว่า การล้างดินรวมกับการเติมสารอีดีทีเอที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดสารหนูได้ 52.34% ในขณะที่สารเอสดีเอส สามารถกำจัดสารหนูได้ 40.83% นอกจากนี้ Chen et al. (2004) ได้ทำการประยุกต์ใช้สารอีดีทีเอช่วยในการบำบัดดินปนเปื้อนด้วยฟิซ โดยพบว่า การเติมสารอีดีทีอลงดินมีส่วนช่วยเพิ่มความทนทานของฟิซต่อโลหะหนัก และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมโลหะหนักในฟิซได้ด้วย

### 2.3 การบำบัดสารพิษด้วยฟิซ (Phytoremediation)

คำว่า Phytoremediation มาจากการรวมคำของ Phyton จากภาษากรีก ซึ่งหมายถึง ฟิซ และคำว่า Remediare จากภาษาละติน หมายถึง การบำบัด เมื่อนำทั้งสองคำนี้รวมกัน จึงมีความหมายว่า การบำบัดสารพิษด้วยฟิซ (Vangronsveld and Cunningham, 1998) ซึ่งเป็นเทคนิควิธีที่นำมาใช้เพื่อปรับปรุงหรือยับยั้งสารพิษแพร่กระจายเข้าสู่ตัวกลางทางสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ดิน น้ำ และอากาศ ทั้งในรูปสารอนินทรีย์ เช่น โลหะหนัก (Heavy Metals) และนิวไคลด์กัมมันตรังสี (Radionuclides) เป็นต้น และในรูปสารอินทรีย์ เช่น ไตรไนโตรโทลูอิน (Trinitrotoluene) ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เบนซีน (Benzene) โทลูอิน (Toluene) เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene) และ ไซลีน (Xylene) เป็นต้น (USEPA, 2000) ทั้งนี้การบำบัดสารพิษด้วยฟิซนั้น จะอาศัยกลไกการทำงานของฟิซในการเคลื่อนย้ายสารพิษจากตัวกลางเข้ามาเก็บกักเก็บยังส่วนต่าง ๆ ของฟิซ หรือใช้กลไกของฟิซในการตรึงสารพิษให้อยู่ในรูปที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งกลไกเหล่านี้จะสามารถช่วยกำจัดหรือลดความอันตรายจากสารพิษ หรือทำให้เหลือสารพิษตกค้างในปริมาณที่น้อยที่สุด (รูปที่ 2.2) โดยปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการฟื้นฟูบำบัดดินปนเปื้อนสารพิษด้วยฟิซคือ การเลือกฟิซที่เหมาะสมต่อการบำบัดสารพิษในตัวกลางต่าง ๆ ดังนั้นการบำบัดสารพิษด้วยฟิซนั้น จึงเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่าย สะดวก และที่สำคัญคือ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Environment Friendly)

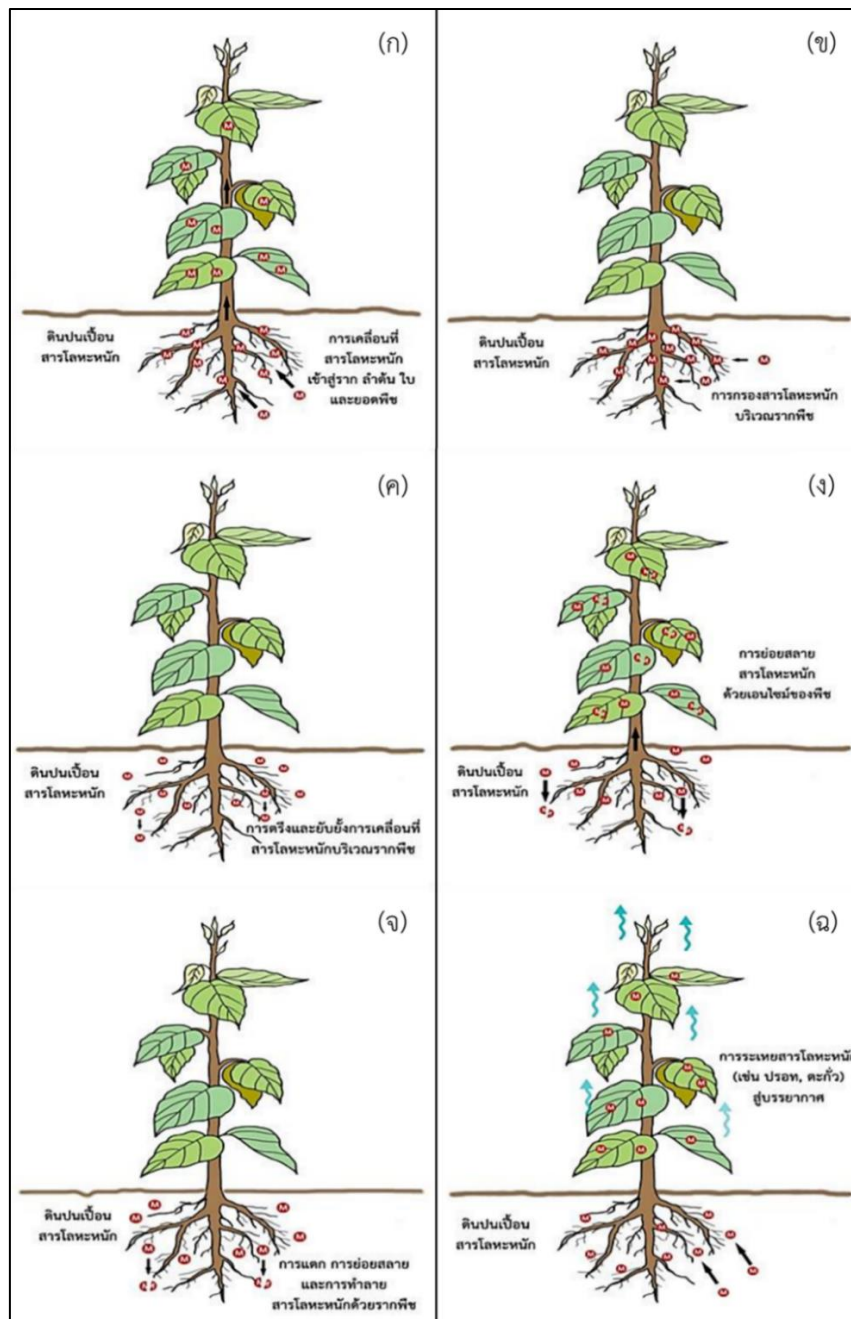


รูปที่ 2.2 กระบวนการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช

ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2558)

### 2.3.1 ประเภทของการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช

การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทตามกระบวนการกำจัดสารมลพิษที่เกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกพืช รวมทั้งบริเวณพื้นที่ปนเปื้อนที่พืชทำการบำบัดสารมลพิษต่าง ๆ โดยสามารถจำแนกได้ทั้งหมด 6 ประเภท ดังรูปที่ 2.3 (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2558)



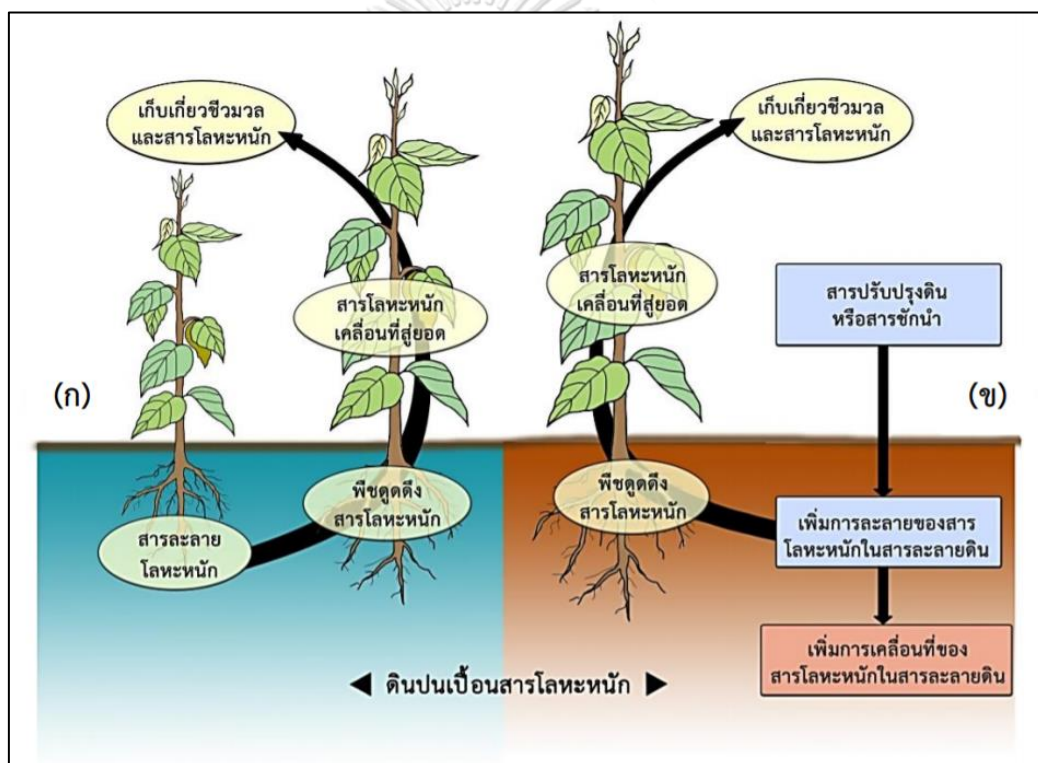
รูปที่ 2.3 ประเภทของการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช (ก) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (ข) การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช (ค) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (ง) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (จ) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช และ (ฉ) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช

ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2558)

#### 1) การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction)

การสกัดสารมลพิษด้วยพืช (รูปที่ 2.3 (ก)) เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการดึงดูด (Uptake) และ สะสม (Accumulation) สารมลพิษได้ในปริมาณสูง โดยพืชที่เลือกใช้นั้นจะต้องเป็น

พืชที่จัดอยู่ในกลุ่มไฮเปอร์แอคคิวมิวเลเตอร์ (Hyperaccumulator) กล่าวคือ เป็นพืชที่มีประสิทธิภาพในการสะสมสารมลพิษได้ในปริมาณที่มากถึง 100-1,000 เท่า หรือมีปริมาณที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่น ซึ่งลักษณะทั่วไปของพืชกลุ่มไฮเปอร์แอคคิวมิวเลเตอร์คือ เป็นพืชที่มีความสามารถในการดูดซับและเคลื่อนย้ายสารมลพิษจากดินปนเปื้อนไปยังรากได้ในอัตราสูง มีการสะสมสารมลพิษได้ในปริมาณมากโดยเฉพาะที่เซลล์รากและส่วนที่อยู่เหนือดินของพืช อีกทั้งยังมีความทนทานต่อระดับความเข้มข้นของสารมลพิษได้มากกว่าพืชทั่วไป โดยการสกัดสารมลพิษด้วยพืชยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การบำบัดสารมลพิษด้วยการปลูกพืชในดินแบบธรรมชาติ (Natural Phytoextraction) และการบำบัดสารมลพิษด้วยการเติมสารปรับปรุงดินหรือสารชักนำ (Induced Phytoextraction) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ประเภทของการสกัดสารมลพิษ (Phytoextraction)

ที่มา: พันธวัศ สัมพันธ์พานิช (2558)

การบำบัดสารมลพิษด้วยการปลูกพืชในดินแบบธรรมชาติ เป็นการบำบัดสารมลพิษด้วยการปลูกพืชบนพื้นที่ปนเปื้อน แล้วทำการรดน้ำหรืออาจใส่ปุ๋ยในปริมาณที่พอเหมาะต่อการเจริญเติบโตของพืชเท่านั้น ซึ่งบางกรณีพืชอาจเติบโตได้เพียงการอาศัยน้ำที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ส่วนใบและลำต้นของพืชที่มีการสะสมสารมลพิษจะถูกเก็บเกี่ยว และทำการบำบัดด้วยวิธีที่เหมาะสมต่อไป (รูปที่ 2.4 (ก)) โดยพืชที่เลือกใช้ มักนิยมใช้พืชที่เติบโตตามธรรมชาติในแหล่งที่มีการปนเปื้อน และเป็นพืชที่มี

ความคงทนต่อโลหะหนักหรือสารมลพิษอื่น ๆ โดยทั่วไปแล้วพืชเหล่านี้มักมีระบบรากดึ้นและเจริญเติบโตช้า อีกทั้งเมื่อมีการเจริญเติบโตเต็มที่ก็จะมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก

การบำบัดสารมลพิษด้วยการเติมสารปรับปรุงดินหรือสารชักนำ เป็นการบำบัดสารมลพิษโดยการเลือกปลูกพืชที่มีอัตราการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ร่วมกับการเติมสารปรับปรุงดินหรือสารชักนำ (Inducing Agent) เพื่อช่วยให้สารมลพิษสามารถเคลื่อนย้ายเข้าสู่พืชได้มากขึ้น อีกทั้งส่งผลให้ความสามารถในการบำบัดสารมลพิษเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.4 (ข))

#### 2) การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizofiltration)

การกรองสารมลพิษด้วยรากพืช (รูปที่ 2.3 (ข)) เป็นการใช้พืชที่มีความสามารถในการกรองดูดซับ และรับเอาสารมลพิษต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปของสารละลายบริเวณรากพืช ให้เคลื่อนย้ายเข้าไปในระบบรากพืช ดังนั้นสารมลพิษจึงสะสมอยู่เฉพาะส่วนราก โดยในส่วนของลำต้น ใบ และดอก จะไม่มีการสะสมหรือปนเปื้อนสารมลพิษ ภายหลังทำการเก็บเกี่ยวแล้วสามารถนำพืชไปใช้ประโยชน์ต่อได้ตามวัตถุประสงค์ ซึ่งพืชที่มีคุณสมบัตินี้จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้บำบัดสารปนเปื้อนในแหล่งน้ำดินที่มีการอุ้มน้ำสูง หรือเป็นระบบไฮโดรโปนิคส์ (Hydroponics)

#### 3) การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (Phytostabilization)

การตรึงสารมลพิษด้วยพืช (รูปที่ 2.3 (ค)) เป็นพืชที่มีความสามารถในการตรึงสารมลพิษภายในดินไว้ที่ราก ทำให้สารมลพิษภายในดินเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่มีความเสถียรมากขึ้น และ/หรือเกิดการตกตะกอน ซึ่งกระบวนการนี้จะสามารถช่วยลดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษภายในดิน และลดการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินหรือขึ้นสู่อากาศได้

#### 4) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (Phytodegradation)

การย่อยสลายสารมลพิษด้วยพืช (รูปที่ 2.3 (ง)) เป็นการที่พืชจะทำการดูดดึงสารมลพิษเข้าไปแล้วจะทำการย่อยสลาย หรือเปลี่ยนแปลงสารมลพิษด้วยกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ภายในพืช ทั้งนี้พืชจะสร้างสารประกอบต่าง ๆ เช่น เอนไซม์ (Enzymes) ขึ้นมาเพื่อย่อยสลายสารมลพิษที่อาจทำความเสียหายให้กับเนื้อเยื่อของพืชได้ หรือเปลี่ยนสารมลพิษให้เป็นสารที่แบคทีเรียสามารถย่อยสลายต่อไปได้

#### 5) การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช (Rhizodegradation)

การย่อยสลายสารมลพิษด้วยรากพืช (รูปที่ 2.3 (จ)) เป็นการสลายตัวของสารมลพิษที่ปนเปื้อนในดินด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ โดยรากพืชจะทำหน้าที่หลั่งสารที่ช่วยกระตุ้นการเติบโตของจุลินทรีย์ออกมา จึงทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารมลพิษได้ดีมากขึ้น



## 6) การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช (Phytovolatilization)

การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืช (รูปที่ 2.3 (ฉ)) เป็นการเลือกใช้พืชที่มีความสามารถในการเป็นสื่อ ช่วยให้เกิดการเคลื่อนย้ายสารมลพิษที่มีอยู่ในดินหรือน้ำออกสู่บรรยากาศ การทำให้สารมลพิษระเหยด้วยพืชนั้น จะเกิดขึ้นตามการเจริญเติบโตของพืชที่มีการดูดตังน้ำที่มีสารอินทรีย์หรือสารอินทรีย์ปนเปื้อนเข้าไปยังใบพืช และเกิดการระเหยเป็นไอออกสู่บรรยากาศที่มีความเข้มข้นของสารพิษในระดับต่ำ หรือเป็นการทำให้สารมลพิษที่มีความสามารถในการระเหยได้ขึ้นมาจากดิน ด้วยแรงดูดตังจากการคายน้ำแล้วปล่อยออกทางใบ ดังนั้นวิธีการบำบัดนี้สารมลพิษเมื่ออยู่ในรูปที่เป็นไประเหยจะมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตน้อยลง

### 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดตังโลหะหนักด้วยพืช

#### 1) ชนิดของโลหะหนัก

โลหะหนักแต่ละชนิดมีลักษณะรูปแบบการถูกปลดปล่อยลงสู่สารละลายดิน และสามารถเคลื่อนย้ายเข้าสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืชได้แตกต่างกัน โดยมีปฏิกริยาที่สำคัญ 2 รูปแบบคือ การแก่งแย่ง (Antagonism) และการดูดยึดด้วยกัน (Synergism) ซึ่งปฏิกริยาทั้งสองแบบมีอิทธิพลต่อสารละลายโลหะหนักในดิน เช่น หากเติมกำมะถันลงดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม จะส่งผลให้พืชสามารถดูดตังแคดเมียมได้มากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม หากในดินมีแคลเซียมและสังกะสี จะส่งผลให้พืชสามารถดูดตังแคดเมียมได้ลดลง เนื่องจากพืชมีความสามารถในการดูดตังแร่ธาตุแตกต่างกัน ซึ่งพืชจะทำการดูดตังแร่ธาตุที่มีประโยชน์ต่อการดำรงชีวิตมากกว่าแร่ธาตุที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช นอกจากนี้รูปแบบทางเคมีของโลหะหนักก็มีผลต่อความสามารถในการดูดตังด้วยพืชเช่นกัน เนื่องจากพืชส่วนใหญ่จะสามารถดูดตังโลหะหนักที่อยู่ในรูปเกลืออนินทรีย์ (Inorganic Salt) ที่ละลายน้ำได้ มากกว่าโลหะหนักที่อยู่ในรูปของเกลืออินทรีย์ (Organic Salt)

#### 2) ชนิดของพืช

พืชแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันไป จึงมีผลทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดตังและสะสมโลหะหนักได้แตกต่างกัน ดังนั้น หากต้องการบำบัดดินด้วยพืช จึงจำเป็นต้องมีการเลือกใช้พืชให้เหมาะสมทั้งในด้านพื้นที่ที่ต้องการบำบัดและในด้านของชนิดโลหะหนักที่ต้องการกำจัดอีกด้วย

#### 3) สมบัติของดิน

3.1) เนื้อดิน ลักษณะของเนื้อดินที่แตกต่างกันสามารถเป็นข้อจำกัดของพืชในการดูดตังโลหะหนักได้ กล่าวคือ ดินที่มีพื้นที่ผิวรวมของอนุภาคมากกว่าจะสามารถดูดซับไอออนซึ่งเป็นธาตุอาหารได้มาก เช่น ดินร่วนจะมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าดินทราย ซึ่งลักษณะของโครงสร้างดินที่พืชต้องการคือ ต้องไม่ขัดขวางการเจริญเติบโตของราก มีการถ่ายเทของอากาศและระบายน้ำได้ดี สามารถอุ้มน้ำให้กับพืชได้ และเป็นที่ยึดเกาะของรากได้ดี

3.2) ค่าความเป็นกรด-ด่างในดิน มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณโลหะหนักในดิน โดยค่าความเป็นกรด-ด่างของดินที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้พืชดูดดึงโลหะหนักได้ลดลง เนื่องจากไอออนของโลหะหนักต่าง ๆ จะสามารถละลายในน้ำได้ดี และอยู่ในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ ในสภาวะที่ดินมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่และการสะสมทางชีวภาพของโลหะหนัก

#### 1) ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินหรือน้ำที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้การดูดดึงโลหะหนักด้วยพืชลดลง เนื่องจากปริมาณไอออนของโลหะหนักที่อยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนประจุได้และละลายน้ำได้นั้นลดลง เช่น แคดเมียมสามารถละลายน้ำและเคลื่อนที่ได้ดีในค่าความเป็นกรด-ด่างระหว่าง 4.5-5.5 อย่างไรก็ตาม เมื่อสภาพแวดล้อมมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น จะพบว่า แคดเมียมเคลื่อนที่ได้น้อยลงหรือไม่เคลื่อนที่เลย ดังนั้นจึงทำให้พืชดูดดึงแคดเมียมได้ลดลง ทั้งนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่างจะส่งผลกระทบต่อโดยตรงการยึดเกาะของโลหะหนักในดิน หรืออนุภาคต่าง ๆ และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของดินมีค่าต่ำลง จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการยึดเกาะระหว่างดินและโลหะหนักลดลง ยกเว้น โลหะหนักจำพวกที่เป็นประจุลบ เช่น สารหนู โครเมียม และซีลีเนียม โดยจากการศึกษาของ Hodgson (1963) พบว่า ประสิทธิภาพการยึดเกาะกับอนุภาคดินของ โบรอน โคบอลต์ ทองแดง แมงกานีส และสังกะสี มีแนวโน้มลดลง เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ที่ประมาณ 5-8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างนั้นเป็นปัจจัยสำคัญในการศึกษาการดูดดึงโลหะหนักด้วยพืช เพราะค่าความเป็นกรด-ด่างส่งผลโดยตรงต่อประจุที่ผิวของอนุภาค เช่น อนุภาคดิน อนุภาคสารอินทรีย์ในดิน และส่งผลต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ของโลหะชนิดอื่น ๆ ในสิ่งแวดล้อมอีกด้วย รวมถึงประสิทธิภาพในการดูดซับประจุบวกของตัวกลางทางสิ่งแวดล้อม ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น ดังนั้น การศึกษาเทคโนโลยีการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนจะต้องคำนึงถึงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการปลูกพืชด้วยเช่นกัน ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการปลูกพืชจะอยู่ประมาณ 6-7 แต่พืชบางชนิดมีความทนทาน และสามารถเติบโตได้ในดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 5.5 เช่น พืชตระกูลมันฝรั่ง พืชตระกูลลูเบอร์รี่ และพืชตระกูลกุหลาบพันปี เป็นต้น

#### 2) ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวก

ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวก เป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถระบุได้ว่า โลหะหนักสามารถจะยึดเกาะกับตัวกลางทางสิ่งแวดล้อมได้ดีหรือไม่ ซึ่งจะมีความสอดคล้องกับปริมาณอินทรีย์วัตถุ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็ก อลูมิเนียม และแมงกานีส รวมถึงสัดส่วนของอนุภาคดินหรือชนิดของดิน ซึ่งส่วนประกอบของดินที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวกแตกต่างกันไป ด้วย กล่าวคือ ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของอนุภาคดินเหนียว (Clay) มีค่าสูงสุด รองลงมาคือ

อนุภาคทรายแป้ง (Silt) และอนุภาคทราย (Sand) ตามลำดับ โดยทั่วไปดินที่มีค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงจะทำให้การบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโดยใช้พืชเป็นไปได้ยากขึ้นด้วย

### 3) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน

ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ที่ผันแปรในดินเป็นผลมาจากกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์ดิน ดังนั้นเมื่อดินมีความชื้นต่ำและระบายอากาศดี จะทำให้จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนสามารถเจริญเติบโตได้ดี โดยค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันอยู่ในช่วง 400 ถึง 700 มิลลิโวลต์ (Stieger and Feller, 1994) หากแต่เมื่อดินมีความชื้นสูง อัตราการหายใจมีมากกว่าอัตราการแพร่กระจายของออกซิเจนบนผิวดินลงสู่ในดิน จะทำให้ดินเริ่มขาดออกซิเจน ซึ่งเมื่อดินขาดออกซิเจนแล้ว กลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถใช้สารอื่นแทนออกซิเจนได้ จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในการหายใจ จึงทำให้จุลินทรีย์สามารถเติบโตได้ และจะมีผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินต่ำลง และค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันลดลงเช่นกัน โดยค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันอาจต่ำลงถึง 400 มิลลิโวลต์ จึงส่งผลให้ปริมาณโลหะหนักสามารถละลายในดินได้มากขึ้น และพืชสามารถดูดดึงโลหะหนักได้มากขึ้น (Muhammad et al., 2009)

### 2.3.4 ข้อดีและข้อจำกัดการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช

#### 1) ข้อดีของเทคโนโลยีการบำบัดดินด้วยพืช

1.1) การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช เป็นเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้บำบัดดินในพื้นที่บริเวณกว้าง เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ค่าใช้จ่ายต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ การบำบัดดินด้วยวิธีอื่น เพราะการเติบโตของพืชอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหลัก และไม่จำเป็นต้องทำการเคลื่อนย้ายดินออกจากพื้นที่ อีกทั้งการบำบัดดินด้วยพืชยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยหรือไม่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเลย และมีความปลอดภัยในการใช้มากกว่าการบำบัดด้วยวิธีการอื่น

1.2) พืชที่เลือกใช้การบำบัดดินกลุ่มที่มีความสามารถในการดูดดึงและสะสมโลหะหนักไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืชได้ในปริมาณสูงนั้น นอกจากจะช่วยลดปริมาณโลหะหนักออกจากดินแล้ว ยังสามารถนำมวลชีวภาพของพืชบำบัดที่เก็บเกี่ยวไปสกัด เพื่อนำโลหะหนักที่สกัดได้ไปผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ หรือนำเอาโลหะหนักที่ได้ไปขายเพื่อเพิ่มมูลค่าต่อได้

1.3) การปลูกพืชบนพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักยังสามารถช่วยลดการพังทลายของดิน (Soil Erosion) ช่วยป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนัก ช่วยป้องกันการเคลื่อนที่ของโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำ จึงเป็นการช่วยลดความเสี่ยงของโลหะหนักเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร นอกจากนี้ พืชที่ปลูกยังช่วยสร้างสารอินทรีย์ที่มีส่วนในการบำรุงดินและเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดินด้วย และหากพืชที่เลือกใช้ในกระบวนการบำบัดมีความเหมาะสมกับพื้นที่บำบัดแล้ว จะทำให้เกิดการแทรกซึมของสารอาหาร น้ำ ออกซิเจน และโลหะหนักในดินสู่พืชได้ดีขึ้น ส่งผลให้พื้นที่บำบัดมีสภาพดีขึ้น อีกทั้งพืช

ที่มีการสะสมโลหะหนักในปริมาณที่มาก จะช่วยให้พืชรอดพ้นจากโรคและแมลงศัตรูพืช เช่น หนอนผีเสื้อ เชื้อรา และแบคทีเรีย เป็นต้น

## 2) ข้อจำกัดของเทคโนโลยีการบำบัดดินด้วยพืช

2.1) การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช ไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดโลหะหนักที่อยู่ลึกกว่าระดับของรากพืชได้ นอกจากนี้หากโลหะหนักเหล่านั้นไม่อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซับได้ก็ไม่สามารถบำบัดหรือกำจัดสารนั้นได้เช่นกัน

2.2) การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืช ถูกจำกัดไว้ด้วยสภาพทางธรณีวิทยา สภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิ ที่ตั้งของพื้นที่ปนเปื้อน ความสูงจากระดับน้ำใต้ดิน และความสามารถของเครื่องมือทางการเกษตร เป็นต้น

2.3) ความสามารถในการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืชแต่ละชนิดนั้นมีความแตกต่างกันออกไป ดังนั้น จึงต้องมีการศึกษาเพื่อคัดเลือกพืชที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้บำบัดเป็นรายกรณี อีกทั้งในปัจจุบันพบว่า ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของพืชที่มีความสามารถในการบำบัดโลหะหนักยังมีข้อจำกัดอยู่มาก จึงมีความจำเป็นต้องมีการศึกษาค้นคว้าต่อไป

2.4) การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารมลพิษด้วยพืชนั้น ประสิทธิภาพของการบำบัดขึ้นอยู่กับความสามารถของพืช อีกทั้งยังใช้ระยะเวลาานาน จึงไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้แก้ปัญหาการปนเปื้อนที่ต้องการแก้ไขในระยะเวลาอันสั้นได้

## 2.4 เสมพ์หรือกัญชา (*Cannabis sativa* subsp. *sativa* L.)

### 2.4.1 ประวัติการปลูกเสมพ์ในประเทศไทย

เสมพ์ เดิมเป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในบริเวณภาคตะวันตกเฉียงเหนือของเทือกเขาหิมาลัย ประเทศอินเดีย สำหรับประเทศไทย เสมพ์ถือเป็นพืชที่มีบทบาทต่อวิถีชีวิตของชาวม้งเป็นอย่างมาก เนื่องจากชาวม้งมีความเชื่อดั้งเดิมว่า เสมพ์นั้นคือ พืชที่พระเจ้าประทานให้ จึงมีการใช้ประโยชน์จากเสมพ์ในการประกอบพิธีกรรมสำคัญต่าง ๆ เช่น การผลิตเส้นด้ายจากเส้นใยเสมพ์มาดมมือทอแรกเกิด การทำสิ่งทอที่ผลิตจากเส้นใยเสมพ์มาเป็นเสื้อผ้า รองเท้า ในวันขึ้นปีใหม่ และใช้เป็นเชือกมัดศพ เป็นต้น ด้วยเสมพ์เป็นพืชที่มีคุณภาพของเส้นใยสูง มีความเหนียว และทนทาน ในประเทศต่าง ๆ มากกว่า 30 ประเทศทั่วโลก จึงนิยมผลิตเสมพ์เชิงอุตสาหกรรม (Industrial Hemp) แต่สำหรับประเทศไทย เสมพ์ถูกจัดให้เป็นกลุ่มพืชเสพติดประเภทที่ 5 เช่นเดียวกับกัญชา แม้ว่าเสมพ์จะมีสารเสพติดที่ต่ำกว่ากัญชามากก็ตาม (สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง, 2559)

เนื่องจากเฮมพ์มีความสำคัญต่อชาวไทยภูเขา สมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ พระบรมราชชนนีพันปีหลวง จึงได้มีพระราชเสาวนีย์ให้ส่งเสริมการปลูกเฮมพ์ เพื่อเป็นการส่งเสริมอาชีพหัตถกรรมแก่เกษตรกร ดังนั้น เพื่อให้ประชาชนเกิดความสับสนเข้าใจผิด คิดว่า กัญชากับกัญชา เป็นพืชเดียวกัน จึงมีคำว่า เฮมพ์ ปรากฏอยู่ในกฎกระทรวงการขออนุญาตและการอนุญาตผลิตจำหน่าย หรือมีไว้ในครอบครองซึ่งยาเสพติดให้โทษ ประเภทที่ 5 เฉพาะเฮมพ์ พ.ศ. 2559 โดยอาศัยอำนาจกฎหมายแม่ คือ พระราชบัญญัติยาเสพติดให้โทษ พ.ศ. 2522 ซึ่งมีนิยามข้อความว่า “เฮมพ์ (Hemp)” หมายถึง พืชที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Canabis sativa* L.subsp.sativa เป็นชนิดย่อยของพืชกัญชา (*Cannabis sativa* L.) ที่มีปริมาณสารเตตราไฮโดรแคนนาบินอย (Tetrahydrocannabinol, THC) ไม่เกินร้อยละ 1.0 ต่อน้ำหนักแห้ง

ต่อมาทางคณะรัฐมนตรีได้ลงมติ ในวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2548 มอบหมายให้สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (สศช.) ทารือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อหาแนวทางกำหนดมาตรฐานในการพัฒนาและส่งเสริมให้สามารถผลิตเฮมพ์เพื่อเป็นรายได้เสริมแก่เกษตรกรได้ จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2554 สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) ได้รับการขึ้นทะเบียนพันธุ์เฮมพ์ที่มีปริมาณสารเสพติด THC ต่ำ จากกรมวิชาการเกษตร จำนวน 4 พันธุ์ และนำไปขยายเพื่อต่อยอดการวิจัย โดยการเพาะปลูกเฮมพ์นี้จะต้องอยู่ภายใต้ระบบการควบคุม เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดที่เกี่ยวข้อง

#### 2.4.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

เฮมพ์เป็นพืชล้มลุกที่อยู่ในตระกูลเดียวกับกัญชาคือ Cannabaceae โดยสามารถแสดงรายละเอียดข้อมูลของเฮมพ์ได้ดังนี้

อาณาจักร	: Plantae
ดิวิชัน	: Magnoliophyta (Flowering plants)
ชั้น	: Magnoliopsida (Dicotyledons)
วงศ์	: Cannabaceae
สกุล	: <i>Cannabis</i> L.
ชนิด	: <i>Cannabis sativa</i> L.

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของเฮมพ์คือ เป็นพืชล้มลุกอายุปีเดียว ลำต้นเป็นสี่เหลี่ยมตั้งตรง มีความสูงเฉลี่ยประมาณ 2-3 เมตร มีรากเป็นระบบรากแก้ว และมีรากแขนงจำนวนมาก ใบเฮมพ์มีลักษณะเป็นใบเดี่ยวรูปฝ่ามือ การเรียงตัวของใบค่อนข้างห่าง และมีการแตกกิ่งก้านน้อย ซึ่งต่างจากกัญชาที่มีลำต้นสูงน้อยกว่า แต่แตกกิ่งก้านมาก และลักษณะใบของกัญชา จะมีขนาดเล็ก แคบ ยาว

และมีการเรียงตัวของใบชิดกัน (วชิระ อ่ำพันธ์ และ ชีระ ชัยพิริยะศักดิ์, 2561) ทั้งนี้สามารถแสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเฮมพ์และกัญชา ได้ดังรูปที่ 2.5 นอกจากนี้ เปลือกเส้นใยของเฮมพ์ จะมีความละเอียด เหนียว ลอกง่าย และให้เส้นใยคุณภาพสูงกว่ากัญชา เพราะกัญชามีเปลือกเส้นใยที่ หยาบ ลอกยาก และเส้นใยสั้น ดังนั้น ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ จึงนิยมนำเส้นใยของเฮมพ์ มาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน), 2562)

### 2.4.3 การขยายพันธุ์

เฮมพ์เป็นพืชล้มลุกมีอายุเพียงปีเดียว สามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี ปลูกง่ายโตเร็ว เพียง 3-4 เดือนสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ โดยช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเฮมพ์ ได้แก่ ช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนกรกฎาคม และหากมีน้ำไม่เพียงพอ สามารถปลูกได้ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงเดือนกรกฎาคม ทั้งนี้ เฮมพ์ มีวิธีการปลูกจนถึงการเก็บเกี่ยว ดังนี้

#### 1) การเตรียมพื้นที่ปลูก

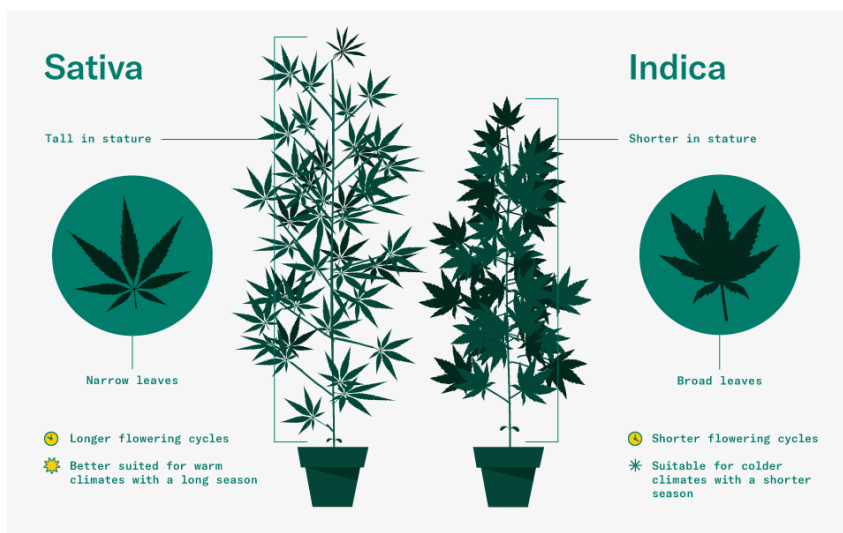
สภาพดินที่เหมาะสมต่อการปลูกเฮมพ์ ดินควรมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.0-7.5 และควรเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ระบายน้ำและอากาศได้ดี เช่น ดินร่วน หรือ ดินร่วนปนทราย เนื่องจากเฮมพ์เป็นพืชที่ไม่ชอบน้ำขัง นอกจากนี้บริเวณที่มีลมแรงจะไม่เหมาะต่อการปลูกเฮมพ์ เนื่องจากเฮมพ์เป็นพืชมีลำต้นสูง ลมที่พัดแรงอาจสามารถทำให้ต้นเฮมพ์หักล้มได้

#### 2) วิธีการปลูก

การปลูกเฮมพ์ที่เหมาะสมคือการปลูกเป็นแถว โดยมีระยะห่างระหว่างแถว 15-20 เซนติเมตร ในการปลูกจะใช้เมล็ดพันธุ์เฮมพ์ 7-10 กิโลกรัมต่อไร่

#### 3) การดูแลรักษา

เมื่อเฮมพ์อายุได้ 10 วันหลังปลูก ควรทำการปลูกซ่อมหลุมที่เมล็ดไม่งอก เมื่อต้นเฮมพ์อายุครบ 20-30 วันหลังปลูก ควรทำการถอนแยกบริเวณที่มีเฮมพ์ขึ้นหนาแน่นเกินไป และคอยกำจัดวัชพืชเสมอ



รูปที่ 2.5 ความแตกต่างทางลักษณะกายภาพระหว่างเฮมพ์และกัญชา

ที่มา: Rahn (2018)

#### 4) การใส่ปุ๋ย

การใส่ปุ๋ยให้กับเฮมพ์นั้น ทั้งชนิดและปริมาณของปุ๋ยขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหารในดิน ดังนั้นจึงควรมีการเก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารเพื่อการจัดการใส่ปุ๋ยอย่างเหมาะสม แต่หากเป็นพื้นที่ที่ไม่มีวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารในดิน อัตราการใส่ปุ๋ยที่แนะนำมี 2 ครั้ง คือ ครั้งแรก คือ เมื่อเฮมพ์มีอายุ 15-20 วันหลังปลูก ให้เติมปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) อัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ และสูตรเสมอ (15-15-15) อัตรา 10 กิโลกรัมต่อไร่ ครั้งที่สอง เมื่อเฮมพ์มีอายุ 30-45 วันหลังปลูก ให้เติมปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) อัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ และสูตรเสมอ (15-15-15) อัตรา 15 กิโลกรัมต่อไร่

#### 5) การเก็บเกี่ยวและการลอกเปลือกเฮมพ์

ควรเก็บเกี่ยวเฮมพ์เมื่อมีอายุ 90-120 วันหลังปลูก เพราะเป็นช่วงที่พืชเติบโตเต็มที่ที่มีความสูงของต้นเฮมพ์ประมาณ 2-3 เมตร และต้องทำการเก็บเกี่ยวก่อนเฮมพ์ออกดอก เนื่องจากเฮมพ์ในช่วงเวลาดังกล่าวมีเส้นใยคุณภาพดีที่สุด โดยการตัดลำต้นชิดดินแล้วรีบใบเฮมพ์ออกให้หมด ให้เหลือเพียงลำต้น สำหรับเกษตรกรที่ต้องการนำเฮมพ์มาทำเป็นเส้นด้ายใช้สอยในครัวเรือนต้องนำเฮมพ์ไปตากแดดให้แห้งประมาณ 4-5 วันก่อน แล้วจึงนำมาลอกเปลือกด้วยมือ แต่สำหรับนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์จะมีการแปรรูปขั้นต้น โดยขนส่งลำต้นสดเข้าสู่โรงงาน เพื่อทำการแยกแแกนและเปลือกด้วยเครื่องจักร เพื่อรักษาคุณภาพเส้นใยเฮมพ์ให้ดีที่สุด ควรทำการแยกภายใน 24 ชั่วโมงหลังเก็บเกี่ยว ทั้งนี้การเก็บเกี่ยวเฮมพ์ และการลอกเปลือกเฮมพ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการเก็บเกี่ยวเฮมพ์ และการลอกเปลือกเฮมพ์ (ก) การเก็บเกี่ยวเฮมพ์ (ข) การแยกเปลือกเฮมพ์ด้วยมือ และ (ค) การแยกเปลือกเฮมพ์ด้วยเครื่องจักร  
ที่มา: รุ่งทิพย์ ลุยเลา (2562)

#### 6) การแปรรูปเฮมพ์สู่ผลิตภัณฑ์

เส้นใยจากเฮมพ์เป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีความยืดหยุ่นสูง แข็งแรง ทนทาน โดยเส้นใยเฮมพ์มีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้นได้ดีกว่าไนลอน แข็งแรงกว่าผ้าฝ้าย และอบอุ่นกว่าลิกนิน (พิชิตพล แก้วงาม, 2562) คุณสมบัติของเส้นใยเฮมพ์ไม่ได้มีแค่ในอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มเท่านั้น โดยธีรวัฒน์ สิ้นศิริ และ พุทธิพัทธ์ ราชคำ (2561) รายงานว่า นอกจากจะนำเส้นใยเฮมพ์มาทำเครื่องนุ่งห่มแล้ว ยังสามารถนำเส้นใยเฮมพ์มาทำเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้อีก เช่น วัสดุเนื้อไม้บด กระดาษ อุตสาหกรรมยานยนต์ และวัสดุธรรมชาติแทนพลาสติก เป็นต้น เนื่องจากเส้นใยเฮมพ์มีลักษณะเฉพาะ คือ มีความพรุนตามธรรมชาติ เมื่อส่องด้วยกล้องขยายพิเศษ พบว่า โครงสร้างภายในไม่มีลักษณะท่อยาว แต่ค่อนข้างจะเต็มไปด้วยรูพรุน ทำให้เฮมพ์มีพื้นผิวที่สามารถดูดซับน้ำได้มาก มีค่าความเป็นฉนวนอยู่ระหว่าง 0.0393–0.0486 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน และมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 40.3–77.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และแกนเฮมพ์มีลักษณะเป็นสีขาวอมน้ำตาล มีน้ำหนักเบา ไม่มีฝุ่น มีคุณสมบัติในการดูดซับกลิ่น น้ำ หรือน้ำมันได้ดี ในต่างประเทศนิยมนำไปผลิตเป็นพลังงานชีวมวลในรูปแบบต่าง ๆ อาทิ ถ่านไม้ เอทานอล เมทานอล หรือ แอลกอฮอล์ นอกจากนี้



แกนเฮมพ์ถูกนำไปใช้งานก่อสร้างอาคาร บ้านเรือน ในรูปแบบของการนำแกนเฮมพ์ที่บดแล้วไปผสมกับปูนปาสเตอร์หรือคอนกรีตเพื่อผลิตเป็นเฮมพ์กรีต หรือใช้ในการผสมเพื่อก่อผนังที่รับน้ำหนักบรรทุกไม่มาก มีค่าความเป็นฉนวนอยู่ระหว่าง 0.033–0.094 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน และมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 5–100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เช่นเดียวกับ ประชุม คำพุ่ม (2562) ได้นำแกนของต้นเฮมพ์ที่เป็นขยะเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเส้นใยมาสร้างเป็นนวัตกรรมใหม่เรียกว่า ‘เฮมพ์ไบโอบล็อก’ ซึ่งเป็นบล็อกก่อสร้างน้ำหนักเบา และใช้เป็นวัสดุฉนวนความร้อนและฉนวนกันเสียงในการก่อสร้างอาคารประหยัดพลังงาน โดยออกแบบเฮมพ์ไบโอบล็อกให้สามารถก่อสร้างอาคารได้ทั้งหลังในระยะเวลารวดเร็ว ด้วยการใช้ระบบเดือยและสลักรางลื่น จึงไม่ต้องสิ้นเปลืองการฉาบปูนปิดทับผิวหน้า เนื่องจากเฮมพ์ไบโอบล็อกเป็นวัสดุก่อสร้างมวลเบาที่เกิดจากธรรมชาติ จึงทำให้มีความคงทนน้อยกว่าวัสดุก่อสร้างมวลรวม เช่น หิน ทราย และปูน แต่เฮมพ์ไบโอบล็อกยังคงมีคุณสมบัติเด่นคือ มีมวลเบา เป็นฉนวนกันความร้อนและเสียงได้ดี อีกทั้งยังช่วยลดภาวะโลกร้อน จึงเหมาะกับการนำไปใช้งานเป็นวัสดุสำหรับการก่อสร้างอาคารที่อนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม ตลอดจนที่พักอาศัยทั่วไป หากแต่ต้องมีมาตรฐานตามที่ มอก. กำหนดด้วย

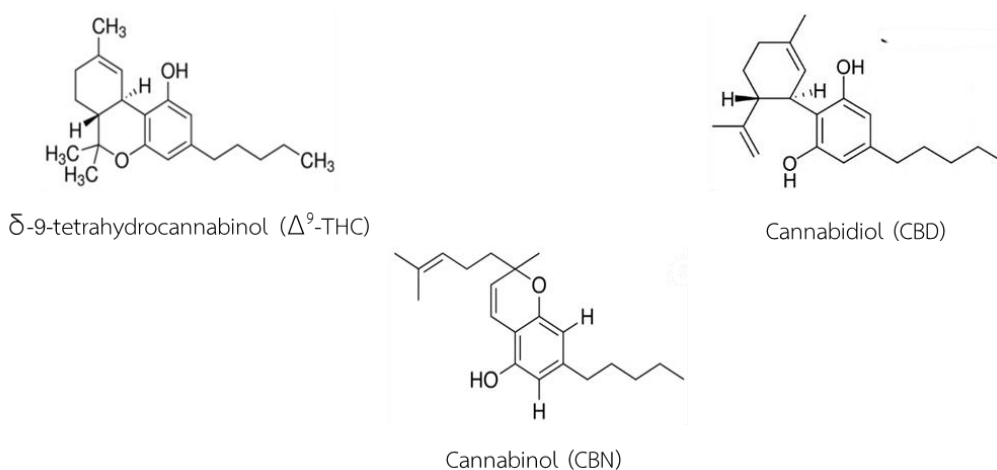
เฮมพ์เป็นพืชที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วนตั้งแต่ราก ลำต้น ใบ ดอก และเมล็ด โดยเฉพาะเส้นใยที่สามารถนำมาผลิตได้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย จึงทำให้มีการศึกษาเกี่ยวกับการแปรรูปเส้นใยเฮมพ์ ให้มีประโยชน์สูงสุดต่ออุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น กิตติศักดิ์ กราบเคหะ (2558) ได้ทำการศึกษาการนำเส้นใยเฮมพ์มาผลิตเป็นฉนวนกันความร้อน โดยทำการผสมเส้นใยเฮมพ์ น้ำยางธรรมชาติ และน้ำ ที่อัตราส่วน 1:1:1, 1:1:2, 2:3:3 และ 3:2:4 ตามลำดับ จากนั้นนำไปขึ้นรูปในภาตสังกะสีขนาด 25x25x3 ตารางเซนติเมตร แล้วนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง แล้วทำการทดสอบหาค่าการนำความร้อน และทดสอบหาคุณสมบัติการลามของไฟตามมาตรฐาน ASTM D635-98 ผลการวิจัยพบว่า ส่วนผสมของใยเฮมพ์ น้ำยางธรรมชาติ และน้ำ ที่อัตราส่วน 3:2:4 โดยน้ำหนัก ให้ค่าความเป็นฉนวนที่เหมาะสมที่สุด โดยให้ค่าการนำความร้อนต่ำสุดเท่ากับ 0.084 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน และมีค่าการลามของไฟต่ำที่สุดเท่ากับ 16.61 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งสาเหตุที่ทำให้อัตราส่วนดังกล่าว เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีที่สุดในการศึกษา เนื่องจากมีสัดส่วนของใยกัญชงมากกว่าน้ำยางธรรมชาติ อีกทั้งใยเฮมพ์มีค่าการนำความร้อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมอื่น นอกจากนี้อัตราส่วนผสมนี้ยังมีปริมาณน้ำมากที่สุด เมื่อระเหยน้ำออกจากฉนวนจะเหลือรูพรุนไว้มาก ซึ่งรูพรุนที่มากจะส่งผลให้มีโพรงอากาศอยู่ข้างใน ซึ่งทำหน้าที่กักเก็บความร้อน จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการกันความร้อนของฉนวนได้ดี เป็นต้น นอกจากนี้ Ali et al. (2018) ได้แสดงให้เห็นประโยชน์ของการใช้เฮมพ์ในการผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพ (Hemp Plastic) โดยรายงานว่าการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างพลาสติกทั่วไปกับ Hemp Plastic พบว่า พลาสติกทั่วไปนั้นจะก่อให้เกิดสารพิษอันตราย ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบโพลีอิน เบนซีน และสารพิษอื่นๆ แต่จะไม่พบ

สารพิษเหล่านั้นใน Hemp Plastic ซึ่งพลาสติกทั่วไปในปัจจุบัน ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นโดยใช้สารประกอบจากปิโตรเลียม ซึ่งเป็นการสูญเสียแหล่งทรัพยากรน้ำมัน แต่ในทางตรงกันข้าม Hemp Plastic ผลิตโดยใช้เส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากต้นเฮมพ์เท่านั้น ดังนั้นจึงไม่มีความเป็นพิษในระหว่างกระบวนการผลิต และหากใช้ต้นเฮมพ์เพียงอย่างเดียวในการผลิตก็จะได้ 100% พลาสติกที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ อีกทั้งต้นเฮมพ์เป็นพืช จึงสามารถปลูกทดแทนและปลูกหมุนเวียนได้ หากนำมาใช้ในการผลิตเป็นพลาสติกอย่างแพร่หลาย ก็จะสามารถทำให้เกิดวงจรใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้นด้วย

#### 2.4.4 องค์ประกอบสำคัญของเฮมพ์

เฮมพ์มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญต่อเภสัชกรรม เนื่องจากมีสารในกลุ่มคานนาบินอยด์ (Cannabinoids) โดยมีโครงสร้างหลักในรูปของเทอร์พีนอยด์ (Terpenoids) มีสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่  $\delta$ -9-tetrahydrocannabinol หรือ THC คานนาบิไดออล (Cannabidiol; CBD) คานนาบินอล (Cannabinol; CBN) และอนุพันธ์ของคานนาบินอยด์อื่น ๆ ดังรูปที่ 2.7

เนื่องจากสาร THC เป็นสารที่ออกฤทธิ์ต่อระบบประสาท คือ จะมีฤทธิ์กระตุ้นประสาท ก่อให้เกิดอาการตื่นเต้น ช่างพูด หัวเราะง่าย แต่ในทางตรงกันข้ามสาร CBD ซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์ยับยั้งการทำให้เกิดการกระวนกระวายของสาร THC จึงเป็นที่มาของความแตกต่างระหว่างเฮมพ์กับกัญชา โดยจะแยกพืชทั้งสองชนิดนี้จากการวัดค่า THC (กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์, 2562) ซึ่งในเฮมพ์จะมีปริมาณ THC อยู่ที่ร้อยละ 0.3-1 ซึ่งต่ำกว่ากัญชาที่มีปริมาณสาร THC สูงถึงร้อยละ 15-20 (ไพลิน ภูวนัย, 2558; วชิระ อำพนธ์ และ อีระ ชัยพิริยะศักดิ์, 2561) ดังนั้น ตามกฎหมายสากลจึงไม่จัดว่าเฮมพ์เป็นยาเสพติด เช่นในประเทศแคนาดา กำหนดให้ค่าความเข้มข้นของ  $\Delta^9$ -THC ต่ำกว่า 0.3% ถือว่าเป็นเฮมพ์ ซึ่งไม่ก่อให้เกิดความมึนเมา (Jerome and Ernest, 2016) แต่สำหรับในประเทศไทย การปลูกเฮมพ์ยังถือว่าเป็นสิ่งผิดกฎหมายหากมีการเพาะปลูกโดยไม่ขออนุญาตจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากในประเทศไทยเฮมพ์ยังถูกจัดให้เป็นกลุ่มพืชเสพติดประเภทที่ 5 เช่นเดียวกับกัญชา แม้ว่าเฮมพ์จะมีสารเสพติดต่ำกว่ากัญชามากก็ตาม



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มคานนาบินอยด์ (Cannabinoids)

ที่มา: ปารีชาติ พจนศิลป์ (2562)

#### 2.4.5 การใช้เฮมพ์ในการฟื้นฟูบำบัดดิน

การใช้เฮมพ์เพื่อบำบัดดินปนเปื้อนสารมลพิษ เป็นการใช้กลไกการทำงานของเฮมพ์เพื่อเคลื่อนย้ายกักเก็บและสะสม หรือทำให้สารมลพิษในดินลดลง ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากรายงานว่า ‘เฮมพ์’ เป็นพืชที่สามารถใช้ในการบำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ที่ปนเปื้อนได้ เพราะเฮมพ์เจริญเติบโตง่ายในทุกสภาพแวดล้อม และมีความคงทนต่อสารมลพิษสูง ดังรายงานของ Linger et al. (2002) ที่มีการระบุภายหลังที่ได้ทำการทดลองปลูกเฮมพ์ในดินปนเปื้อนโลหะหนัก แล้วพบว่า ทุกส่วนของเฮมพ์มีการสะสมโลหะหนัก หากแต่ละส่วนของเฮมพ์มีการสะสมโลหะหนักแตกต่างกันเป็นอย่างมาก ซึ่งในการทดลองของ Linger ครั้งนี้ยังพบว่า ใบเป็นส่วนที่มีการสะสมโลหะหนักมากที่สุด นอกจากนี้ยังได้มีการตรวจสอบคุณภาพของเส้นใยเฮมพ์ หลังผ่านการปลูกในดินปนเปื้อน พบว่า โลหะหนักไม่มีผลต่อคุณภาพของเส้นใยเฮมพ์แล้วในเวลาต่อมา นอกจากนี้ Linger et al. (2005) ก็ได้ทำการศึกษาการเจริญเติบโตและการสังเคราะห์แสงของเฮมพ์บนดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมในปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการศึกษาพบว่า รากเฮมพ์มีความคงทนต่อแคดเมียมสูง และแคดเมียมไม่มีผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของราก นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่สูงนั้นส่งผลทำให้มีการสังเคราะห์แสงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tang et al. (2015) ที่ทำการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียม ที่ส่งผลต่อการเติบโตของต้นเฮมพ์ โดยพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่สูงขึ้น ส่งผลให้ระดับของคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์ในใบของเฮมพ์ลดลง อย่างไรก็ตาม อัตราการสังเคราะห์แสงสุทธิ (Pn) อัตราการคายน้ำ (Tr) และค่าชกนการเปิด-ปิดปากใบ (Gs) ยังมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมสูงขึ้นเช่นกัน จึงเป็นสาเหตุให้เฮมพ์มีการสังเคราะห์แสงลดลง นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยของ Citterio et al.

(2003) ที่ทำการศึกษาศักยภาพของเฮมพ์ในการสะสมโลหะหนัก โดยภายหลังทำการทดลองปลูก เมล็ดเฮมพ์ลงในดิน 2 ชนิด ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ ดินชุดที่ 1 ประกอบด้วย แคดเมียม นิกเกิล และโครเมียม ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 27, 74 และ 126 ไมโครกรัม/กรัม ตามลำดับ และดินชุดที่ 2 ประกอบด้วย แคดเมียม นิกเกิล และโครเมียม ที่มีปริมาณความเข้มข้น 82, 115 และ 139 ไมโครกรัม/กรัม ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ตั้งแต่เมล็ดเริ่มงอก จนถึงวัยพร้อมเก็บเกี่ยวนั้น ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในด้านการเจริญเติบโตและรูปพรรณสัณฐานวิทยา แต่ในทางตรงกันข้าม เฮมพ์มีการตอบสนองต่อพิษของโลหะหนัก ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณที่เพิ่มขึ้นของไฟโทคีเลติน (Phytochelatin) และ DNA ในระหว่างการเจริญเติบโต ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เฮมพ์มีความสามารถในการป้องกันการถูกทำลายของเซลล์ได้ และเฮมพ์มีการสะสมแคดเมียมในรากเป็นส่วนใหญ่ และมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกดูดซับในเนื้อเยื่อส่วนเหนือดิน

จากปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นได้ว่า เฮมพ์เป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณสูง แต่ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีกมากที่มีผลต่อการสะสมโลหะหนักในเฮมพ์ เช่น รูปฟอร์มของโลหะหนัก ค่าความเป็นกรด-ด่างในดิน รวมถึงการเติมสารเคมีเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของเฮมพ์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังเช่น Hadi et al. (2014) ได้ทำการศึกษาคผลของยูเรีย และสารอิตีทีเอ ที่มีต่อการเจริญเติบโตของเฮมพ์ที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วและแคดเมียม ผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่เติมยูเรียร่วมกับสารอิตีทีเอนั้น เฮมพ์มีการสะสมตะกั่วและแคดเมียมสูงที่สุด โดยแต่ละส่วนของเฮมพ์มีการสะสมตะกั่วและแคดเมียมต่างกัน โดยส่วนที่มีการสะสมตะกั่วและแคดเมียมสูงที่สุดคือ ราก>ลำต้น>ใบ ทั้งนี้เนื่องจากยูเรียสามารถช่วยเพิ่มการเติบโตด้านมวลชีวภาพของเฮมพ์ให้สูงขึ้น ในขณะที่สารอิตีทีเอช่วยทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายโลหะในดินเข้าสู่เนื้อเยื่อพืชได้ง่ายขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่า การเติมยูเรียกับสารอิตีทีเอร่วมกัน สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมโลหะหนักในพืชได้มากขึ้น นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยของ (Shi et al., 2009) ทำการศึกษาศักยภาพของกรดซาลิไซลิก (Salicylic Acid) ต่อการยับยั้งการดูดซับแคดเมียมเข้าสู่เฮมพ์ โดยก่อนทำการปลูกเมล็ดเฮมพ์ในดินปนเปื้อน ได้ทำการแช่เมล็ดเฮมพ์ในกรดซาลิไซลิกนาน 6 ชั่วโมง จากนั้นจึงค่อยนำเมล็ดมาเพาะลงในดินที่มีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียม เท่ากับ 0, 25, 50 และ 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม จากผลการทดลอง พบว่า แคดเมียมส่งผลทำให้ปริมาณมวลชีวภาพลดลงเล็กน้อย (12.0–26.9% สำหรับราก และ 8.7–29.4% สำหรับส่วนเหนือดิน) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เฮมพ์มีความสามารถในการทนต่อความเครียดของแคดเมียมได้ นอกจากนี้ยังพบว่า แคดเมียมมีผลต่อการยับยั้งการสังเคราะห์แสงของเฮมพ์เล็กน้อย ปริมาณมาลอนไดอัลดีไฮด์ (Malondialdehyde) ไม่เปลี่ยนแปลง และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (Superoxide Dismutase;

SOD) และกิจกรรมเพอร์ออกซิเดส (Peroxidase; POD) ในต้นเฮมพ์ นอกจากนี้ยังพบว่า เฮมพ์มีการสะสมแคดเมียมในรากสูงกว่าส่วนเหนือดิน 25.0–29.5 เท่า จึงสามารถสรุปได้ว่า การปรับสภาพเมล็ดเฮมพ์ด้วยกรดซาลิไซลิก สามารถช่วยด้านการเข้าทำลายของสารแคดเมียมที่อาจมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชได้

## 2.5 การทดสอบความเป็นพิษของพืช

เฮมพ์เป็นพืชที่สามารถนำมาใช้งานได้ทั้งด้านอุตสาหกรรม การแพทย์ และสิ่งแวดล้อม จึงเป็นที่ยอมรับและมีการเพาะปลูกเฮมพ์เพื่อนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่มีการนำเฮมพ์ที่ผ่านการฟื้นฟูดินมาแปรรูปเป็นอาหาร เสื้อผ้า หรือผลิตภัณฑ์ยา เนื่องจากความเป็นพิษของโลหะยังคงสะสมอยู่ในเฮมพ์ ดังนั้น เฮมพ์ที่ผ่านการฟื้นฟูดินจะถูกนำไปกำจัดต่อ หรือนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ (Kazmira, 2019) และเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานเฮมพ์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด จึงควรมีการทดสอบความเป็นพิษของโลหะหนักที่สะสมอยู่ในเฮมพ์ ซึ่งนับว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จากเฮมพ์ โดยเฉพาะเส้นใย ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปอื่นได้ เพราะกระบวนการทดสอบความเป็นพิษเป็นวิธีการที่สามารถช่วยสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้บริโภค โดยสามารถทำการทดสอบความเป็นพิษได้ตามขั้นตอนการประเมินความเสี่ยง ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment Paradigm)

การประเมินความเสี่ยงของสารมลพิษจากสิ่งแวดล้อม แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ

1) การบ่งชี้ความเป็นอันตราย (Hazard Identification)

ขั้นตอนการบ่งชี้ความเป็นอันตราย เป็นขั้นตอนที่ต้องมีการศึกษาความเป็นอันตรายของสารพิษแต่ละชนิดเพื่อทราบข้อมูลทางกายภาพและทางเคมี มีการจัดลำดับความสามารถในการก่อให้เกิดอันตราย (Health Hazardous Ranking: HR) ซึ่งสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ เป็นการศึกษาความเสี่ยงของแคดเมียมที่สะสมอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของเฮมพ์ โดยค่าแสดงความเป็นพิษของแคดเมียมและสารประกอบต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งจากตารางแสดงให้เห็นว่า หากมีแคดเมียมปนเปื้อนในอากาศ RfD เท่ากับ  $5.70 \times 10^{-5}$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน จะหมายความว่า หากมีชายคนหนึ่งหนัก 50 กิโลกรัม จะได้รับแคดเมียมปนเปื้อนในบรรยากาศผ่านการหายใจในหนึ่งวัน เท่ากับ  $50 \times 5.70 \times 10^{-5}$  มิลลิกรัม หรือมีค่าเท่ากับ 0.0029 มิลลิกรัม ซึ่งหากได้รับเรื้อรังปริมาณเท่านี้ไปตลอดอายุขัยถึง 70 ปี จะถือว่า ปริมาณที่ได้รับไม่เป็นอันตรายต่อชายคนนี้ในการเกิดโรคที่ไม่ใช่การเป็นมะเร็ง (Noncarcinogen)

2) การประเมินผลที่ตอบสนองต่อขนาดที่ได้รับ (Dose-Response Assessment) และการประเมินการได้รับสัมผัส (Exposure Assessment)

สำหรับขั้นตอนการประเมินผลที่ตอบสนองต่อขนาดที่ได้รับและการได้รับสัมผัส สามารถคิดได้จากการทำงาน การสัมผัสผลิตภัณฑ์ รวมถึงวิธีการได้รับต่าง ๆ เช่น ได้รับจากการหายใจ การกิน หรือการสัมผัสโดยตรง จากนั้นจึงมาจำแนกลักษณะของความเสี่ยงที่เกิด (Risk Characterization) ว่ามีความเสี่ยงมากน้อยเพียงใด ในรูปของ Probabilistic Risk Assessment ซึ่งเป็นการประเมินในรูปโอกาสที่จะเกิดความเป็นพิษจากเหตุการณ์ใด ๆ ในรูปความน่าจะเป็นว่าจะเกิดโอกาสอันตรายนั้น ๆ เกินค่าความปลอดภัยหรือไม่ (เอกษา ตนานนท์ชัย, 2562)

ตารางที่ 2.3 ค่าแสดงความเป็นพิษของแคดเมียม และสารประกอบต่าง ๆ

สาร	ขนาดอ้างอิง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน)*		ค่าศักยภาพของการเกิดมะเร็ง**	
	วิถีที่ได้รับ		วิถีที่ได้รับ	
	ปาก	หายใจ	ปาก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน)	หายใจ (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมต่อวัน)
แคดเมียม	$1.00 \times 10^{-3}$	$5.70 \times 10^{-5}$	$3.80 \times 10^{-1}$	$1.80 \times 10^{-3}$
สารหนู	$3 \times 10^{-4}$	-	1.5	$4.3 \times 10^{-3}$
เมทิลเมอร์คิวรี	$1 \times 10^{-4}$	-	-	-

ที่มา: <http://www.epa.gov/iris/subst/0278.htm>

\* ขนาดอ้างอิง (Reference dose, RfD) = ปริมาณสารที่ประเมินว่าได้รับแล้วตามวิถีที่ระบุตลอดอายุขัย จะไม่ทำให้เกิดอันตราย หรือเกิดผลร้ายอย่างใด

\*\* ค่าศักยภาพของการเกิดมะเร็ง (Cancer Potential Slope factor, CPS) = ความชันจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองที่เกิดมะเร็งกับขนาดที่ได้รับตามวิถีที่ระบุ แคดเมียมจัดเป็นสารก่อมะเร็ง ระดับ B1 น่าจะเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ มีข้อมูลและหลักฐานยืนยันการเกิดมะเร็งในมนุษย์มีจำนวนจำกัด (Probable Human Carcinogen - Based on Limited Evidence of Carcinogenicity in Humans)

3) จำแนกลักษณะของความเสี่ยงที่เกิด (Risk Characterization)

การจำแนกลักษณะของความเสี่ยงที่เกิด สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 กรณี ได้แก่

3.1) สารพิษที่ไม่ก่อมะเร็ง (Noncarcinogen) เป็นการจำแนกความเสี่ยงจากผลรวมของสัดส่วนความเป็นอันตราย (Hazard quotient, HQ) โดยคิดผลรวมจากดัชนีย่อยความเป็นอันตราย

ของสารพิษ (Hazard index, HI) ถ้าผลที่วิเคราะห์ได้มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่า ปริมาณสารที่ได้รับเข้าไปยังเป็นการเสี่ยงที่ยอมรับได้ถือว่า ยังปลอดภัย แต่ถ้าหาก HI หรือ HQ มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่า ผู้รับสารนั้น ๆ มีความเสี่ยงที่จะได้รับความอันตรายตาสารพิษนั้น ในการก่อให้เกิดโรคอื่นที่ไม่ใช่ มะเร็ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร ดังสมการที่ 2.2 และ 2.3 ต่อไปนี้ (สุเทพ เรืองวิเศษ, 2558)

$$\text{กรณีมีสารพิษชนิดเดียว} \quad HI = \frac{CDI}{RfD} \quad 2.2$$

$$\text{กรณีมีสารพิษหลายชนิด} \quad HQ = HI_1 + HI_2 + HI_3 \quad 2.3$$

เมื่อ	$HI_1, HI_2, HI_3$	=	ดัชนีย่อยความเป็นอันตรายของสารพิษชนิดที่ 1, 2, 3
	CDI	=	ขนาดที่ได้รับแบบเรื้อรังในแต่ละวัน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน)
	RfD	=	ปริมาณสารที่ได้รับแล้วตามวิถีที่ระบุตลอดอายุขัย ไม่ทำให้เกิดอันตราย หรือเกิดผลร้ายอย่างใด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน)
	HQ	=	สัดส่วนความเป็นอันตรายจากการได้รับสารต่าง ๆ

3.2) สารพิษที่ก่อมะเร็ง (Carcinogen) จำแนกความเสี่ยงจากโอกาสเกิดมะเร็งได้ จากผลคูณของ CDI กับค่าศักยภาพในการก่อมะเร็ง หรือ Potential Factor (PF) ที่ประมวลมาจากขั้นตอนการทำการประเมินผลที่ตอบสนองต่อขนาดที่ได้รับ (Dose-Response Assessment) ผลคูณที่ได้แปลเป็นค่าความเสี่ยงที่รับได้ (Acceptable Risk, R) ต้องเกิดผลตอบสนองน้อยกว่าหนึ่งในล้าน ถ้าอยู่ในช่วง  $10^{-6} - 10^{-5}$  หรือน้อยกว่าหนึ่งในแสน จัดเป็นความเสี่ยงต่ำ (Low Risk) ถ้ามากกว่าหนึ่งในแสนจัดเป็นความเสี่ยงปานกลาง (Medium Risk) ถ้ามากกว่าหนึ่งในหมื่นจัดเป็นความเสี่ยงสูง (High Risk) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.4 ดังต่อไปนี้

$$\text{คิดความเสี่ยง} \quad R = CDI * PF \quad 2.4$$

เมื่อ	R	=	ความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งจากการได้รับสารพิษ
	CDI	=	ขนาดที่ได้รับแบบเรื้อรังในแต่ละวัน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน)
	PF	=	ค่าศักยภาพของการเกิดมะเร็ง

ทั้งนี้หากต้องการศึกษาความเป็นพิษของพืชเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของแคดเมียมที่สะสมอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของเฮมพ์ ก่อนจะนำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินความเสี่ยงตามขั้นตอนต่าง ๆ สามารถทำได้โดย นำตัวอย่างเฮมพ์มาทำการย่อยจากของแข็งให้อยู่ในรูปของสารละลาย จากนั้นนำตัวอย่างของสารละลายมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer; ICP-MS) หรือเครื่องอินดักทีฟพลาสมาออปติคอลลิมิสชันสเปกโตรมิเตอร์ (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry; ICP-OES) หรือ เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer; AAS) (Wieliczko, 2019) ทั้งนี้จากการศึกษาของ Shi and Cai (2009) ที่ทำการทดสอบความสามารถของเฮมพ์ต่อความคงทน และการสะสมแคดเมียมที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมในปริมาณที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า เฮมพ์มีความคงทนต่อแคดเมียมสูง และยังสามารถในการสะสมแคดเมียมสูงเช่นกัน โดยบริเวณที่มีการสะสมแคดเมียมสูงที่สุดคือ ราก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hadi et al. (2014) ที่รายงานว่ เฮมพ์มีความสามารถในการสะสมตะกั่วและแคดเมียมในแต่ละส่วนของพืชต่างกัน โดยรากเป็นส่วนที่มีการสะสมตะกั่วและแคดเมียมมากที่สุด ตามด้วยลำต้นและใบ อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวยังไม่ครอบคลุมปริมาณโลหะหนักที่สะสมอยู่ภายในเส้นใยของเฮมพ์ และหากมีการนำเฮมพ์ที่ผ่านการฟืนฟูดินปนเปื้อนแคดเมียมมาทำการแยกวิเคราะห์หาความเป็นพิษของโลหะหนักทั้งหมดในเส้นใย และแกนเฮมพ์แล้วพบว่า ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดมีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดยมาตรฐานสิ่งทออินทรีย์ระดับโลก (Global Organic Textile Standard (GOTS), 2017) ที่กำหนดให้มีปริมาณแคดเมียมในเส้นใยทั้งหมดไม่เกิน 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมนั้น สามารถนำเส้นใยเฮมพ์ไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

## 2.6 แสงซินโครตรอน (Synchrotron Light)

แสงซินโครตรอน คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับแสงของดวงอาทิตย์ แต่แสงของซินโครตรอนนั้นเกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคที่มีประจุ เช่น อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเกือบเท่าความเร็วแสง และถูกบังคับให้เลี้ยวโค้งด้วยสนามแม่เหล็ก จึงทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานบางส่วน และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เรียกว่า “แสงซินโครตรอน” (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน), 2562)



### 2.6.1 ประโยชน์ของแสงซินโครตรอน

แสงซินโครตรอนนั้นสามารถระบุคุณสมบัติของสิ่งต่าง ๆ ได้หลากหลาย เช่น องค์ประกอบ ธาตุ สถานะทางเคมีของธาตุ โครงสร้างอะตอม โครงสร้างโมเลกุล รูปร่างของโมเลกุล โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ และการกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิด เป็นต้น จึงทำให้แสงซินโครตรอนนิยมถูกนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

#### 1) ด้านการแพทย์

แสงซินโครตรอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการศึกษาโครงสร้างของสารชีวโมเลกุล ที่มีขนาดเล็กและมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ซึ่งพบในเซลล์สิ่งมีชีวิต เช่น โปรตีน กรดนิวคลีอิก เป็นต้น โดยตัวอย่างการประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนทางการแพทย์ เช่น การศึกษาวิจัยสเต็มเซลล์ (เซลล์ต้นกำเนิด) เนื่องจากแสงซินโครตรอนสามารถใช้ตรวจวิเคราะห์ ติดตามระยะการเจริญและการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ต้นกำเนิด ที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นเซลล์เป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ทางชีวโมเลกุลที่ปกติมีค่าใช้จ่ายสูง ลดขั้นตอนในการตรวจวิเคราะห์สามารถนำไปใช้ได้จริงในห้องปฏิบัติการสำหรับการเพาะเลี้ยงและเหนี่ยวนำเซลล์ต้นกำเนิดไปเป็นเซลล์เป้าหมายชนิดอื่น ๆ เช่น การตรวจสอบเซลล์ต้นที่เปลี่ยนแปลงมาจากเซลล์ต้นกำเนิดตัวอ่อนของหนู และการตรวจจำแนกเซลล์กระดูกอ่อนจากเซลล์ต้นกำเนิด เป็นต้น

#### 2) ด้านชีววิทยา

แสงซินโครตรอนนั้นมีความสามารถในการสร้างภาพสองมิติและสามมิติ จึงทำให้ศึกษากายวิภาคของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ได้ทั้งภายในและภายนอก โดยไม่จำเป็นต้องทำการผ่าสิ่งมีชีวิตที่ต้องการศึกษา ซึ่งสามารถทำการศึกษาได้ตั้งแต่สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น แมลง หนอน ไปจนถึงสิ่งมีชีวิตขนาดใหญ่ เช่น สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม หรือแม้แต่มนุษย์อีกด้วย

#### 3) ด้านอุตสาหกรรมอาหาร

แสงซินโครตรอนในย่านรังสีอินฟราเรดนั้น สามารถใช้ตรวจสอบปริมาณของโปรตีนในอาหารได้ ซึ่งเป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมอาหารในหลาย ๆ ด้าน เช่น สามารถใช้แสงซินโครตรอนตรวจสอบอัตลักษณ์ของเนื้อสัตว์แต่ละสายพันธุ์ได้ ซึ่งที่ผ่านมามีการใช้ตรวจสอบอัตลักษณ์เนื้อไก่สายพันธุ์โคราช และความสามารถเดียวกันนี้ ยังใช้ในการศึกษาวิจัยหาอุณหภูมิในการปรุงสุกเนื้อสัตว์ที่เหมาะสม เพื่อที่จะให้มีปริมาณโปรตีนคงอยู่มากที่สุด

#### 4) ด้านอุตสาหกรรมวัสดุและวัสดุขั้นสูง

วัสดุขั้นสูง (Advanced Materials) เช่น เซรามิกที่สังเคราะห์จากสารประกอบออกไซด์ อนินทรีย์ หรือวัสดุที่สามารถเปลี่ยนแรงกดเป็นกระแสไฟฟ้าได้ (Piezoelectric Materials) กำลังเป็นที่นิยมมากขึ้นในปัจจุบันเนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายรูปแบบ เนื่องจากคุณลักษณะที่พิเศษของวัสดุเหล่านี้ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างอะตอมและสถานะทางเคมีของอะตอมเหล่านั้น เทคนิคการทดลองที่ใช้แสงซินโครตรอน เช่น การวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ จึงมีประโยชน์ต่อการศึกษาคิดค้นวัสดุใหม่ ๆ เหล่านี้ เนื่องจากสามารถให้ข้อมูลในระดับอะตอมของวัสดุได้ นอกจากนี้ นักวิทยาศาสตร์ยังสามารถทำการศึกษาวิจัยการเปลี่ยนแปลงในระดับอะตอมในขณะที่วัสดุเหล่านี้อยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ได้รับแรงกด ได้รับแรงดึง ได้รับกระแสไฟฟ้า หรือมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เป็นต้น การศึกษาคิดค้นวัสดุก่อสร้างใหม่ ๆ เช่น ซีเมนต์ เหล็ก โลหะอัลลอย หรือแม้แต่พลาสติก ที่มีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะ ก็ได้รับประโยชน์จากการวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอนด้วยเช่นกัน

#### 5) ด้านโบราณคดี

เทคนิคการทดลองที่ใช้แสงซินโครตรอน สามารถบอกให้รู้ถึงองค์ประกอบและโครงสร้างของวัตถุได้โดยไม่ทำลายหรือมีผลอื่นใดต่อวัตถุที่นำมาศึกษา ทำให้เหมาะที่จะนำแสงซินโครตรอนไปใช้ในการศึกษาวัตถุโบราณหรือวัตถุที่มีคุณค่าสูงอื่น ๆ ได้

### 2.6.2 การผลิตแสงซินโครตรอน

แสงซินโครตรอนถูกสร้างขึ้นจากเครื่องเร่งอนุภาค (Particle Accelerator) แนววงกลม (Circular Accelerator) ดังนั้น เครื่องเร่งอนุภาคดังกล่าวจึงถูกเรียกว่า เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron Light Source) ซึ่งจะทำหน้าที่เร่งพลังงานของอนุภาคที่มีประจุให้มีพลังงานสูง อนุภาคที่มีพลังงานสูงจะมีความเร็วสูงมากจนเกือบเท่าความเร็วของแสง ซึ่งสามารถแสดงเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) (2562)

องค์ประกอบและหน้าที่การทำงานของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ประกอบด้วย

1) ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun)

ปืนอิเล็กตรอน ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจำนวนมาก โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้กับไส้โลหะของปืนอิเล็กตรอนจนร้อน จึงทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา จากนั้นจะใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแรงสูงช่วยวก ในการดึงอิเล็กตรอนให้วิ่งเข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรงต่อไป

2) เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (Linear Accelerator : Linac)

เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง ทำหน้าที่แบ่งอิเล็กตรอนที่ออกจากปืนอิเล็กตรอนให้เป็นกลุ่ม ๆ เรียกว่า Electron Bunch หลังจากนั้นจะเร่งอิเล็กตรอนในแนวเส้นตรงด้วยคลื่นไมโครเวฟ ให้มีพลังงานสูงถึง 40 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (40 MeV) และส่งไปยังเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม

3) เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (Booster Synchrotron)

เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม ทำหน้าที่เพิ่มพลังงานอิเล็กตรอนในแนววงกลมด้วยคลื่นวิทยุ ซึ่งการที่จะเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงมากตามที่เรากำลังต้องการด้วยเครื่องเร่งอนุภาคในแนวเส้นตรงเพียงอย่างเดียว นั้น ตัวเครื่องเร่งอนุภาคจะต้องมีความยาวหลายกิโลเมตร แต่ด้วยการคิดค้นของนักวิทยาศาสตร์ จึงได้ออกแบบเครื่องเร่งอนุภาคให้เป็นแนววงกลม เพื่อบังคับอิเล็กตรอนให้วิ่งในแนววงกลม และมีพลังงานมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีพลังงานเท่ากับ 1,000 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1 GeV) ในเวลาประมาณ 0.6 วินาที หรือเกือบเท่าความเร็วแสง แล้วจึงถูกส่งต่อไปยังวงกักเก็บอิเล็กตรอนต่อไป

#### 4) วงกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage Ring)

วงกักเก็บอิเล็กตรอน ทำหน้าที่เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงถึง 1,200 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1.2 GeV) วงกักเก็บอิเล็กตรอนประกอบด้วยแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ได้แก่ แม่เหล็กสองขั้ว สี่ขั้ว และหกขั้ว เพื่อทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงเหล่านี้เคลื่อนที่ภายในท่อสุญญากาศ โดยบริเวณที่เป็นแม่เหล็กบังคับเลี้ยวสองขั้ว (Bending Magnet) จะเป็นบริเวณที่มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า “แสงซินโครตรอน”

#### 5) ระบบลำเลียงแสง (Beamlines: BL)

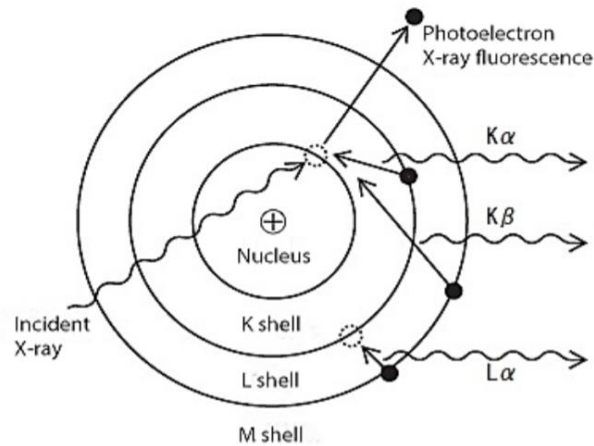
ระบบลำเลียงแสง คือ ระบบที่ทำหน้าที่นำและเลือกแสงซินโครตรอนในย่านที่ต้องการจากวงกักเก็บอิเล็กตรอนส่งไปยังสถานีทดลอง ระบบลำเลียงแสง ประกอบด้วย ท่อสุญญากาศ (Vacuum) กระจกรวมแสง (Collimating Mirror) ระบบคัดเลือกพลังงานแสง (Monochromator) กระจกโฟกัสแสง (Focusing Mirror) ระบบช่องสำหรับแสงส่องผ่าน (Slit) และอุปกรณ์ปลีกย่อยอื่น ๆ ส่วนท้ายสุดของระบบลำเลียงแสงจะเป็นสถานีทดลอง ซึ่งมีระบบวัดสัญญาณติดตั้งอยู่เพื่อดำเนินงานด้วยเทคนิคการทดลองเฉพาะด้าน

#### 6) สถานีทดลอง (Experimental Station)

ณ สถานีทดลอง เมื่อแสงซินโครตรอนวิ่งชนกับตัวอย่างจะเกิดการกระเจิง (Scattering) การดูดกลืน (Absorption) การปลดปล่อย (Emission) หรือการเรืองรังสี (Fluorescence) แล้วผ่านตัวตรวจวัดสัญญาณ (Detector) ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์และประมวลผลโดยนักวิทยาศาสตร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างของสสารในระดับโมเลกุลหรือโครงสร้างอะตอม

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

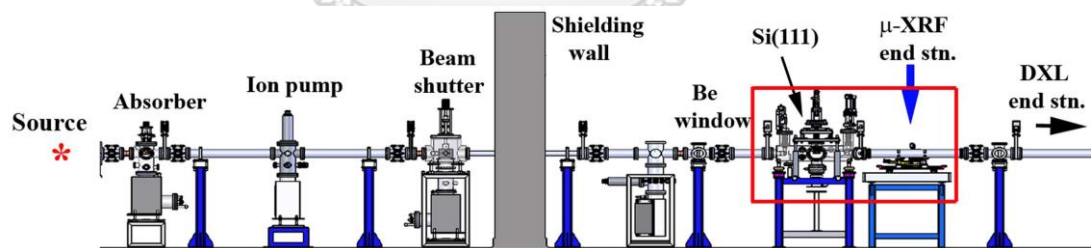
เทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ หรือ เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการศึกษารายละเอียดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่าง โดยอาศัยความต่างของชั้นพลังงานของแต่ละธาตุ โดยเมื่อทำการกระตุ้นอะตอมด้วยการให้พลังงานที่มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นในจะทำให้เกิดที่ว่าง และเมื่ออิเล็กตรอนชั้นนอกลงมาแทนที่ อะตอมจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า "การเรืองรังสีเอกซ์" (ดังรูปที่ 2.9) ปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถนำมาใช้หาชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างได้ ซึ่งข้อดีของเทคนิคนี้คือ มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างไม่ยุ่งยาก และเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายคุณสมบัติของตัวอย่าง (Non-Destructive Method) อีกทั้งแสงซินโครตรอนยังมีความเข้มสูง จึงทำให้สามารถโฟกัสลำรังสีเอกซ์ให้มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรได้ ซึ่งเหมาะสำหรับการหาองค์ประกอบของธาตุที่บริเวณเล็ก ๆ บนตัวอย่างที่ไม่เป็นเนื้อเดียว นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ได้ (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน), 2563)



รูปที่ 2.9 กลไกการเกิดการเรืองรังสีเอกซ์

ที่มา: Theisen (1965)

ระบบลำแสงแม่โครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ Absorber และ Beam Shutter ทั้งสองส่วนนี้จะทำหน้าที่เปิดปิดเพื่อให้แสงซินโครตรอนผ่านไปยังสถานีทดลอง โดยมีกำแพงกันรังสี (Shielding Wall) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้รังสีแกมมาจากวงกักเก็บอิเล็กตรอน หลุดลอดออกมาข้างนอก จากนั้นแสงซินโครตรอนจะถูกกรองด้วย Beryllium Window ที่จะทำให้หน้าที่เป็นตัวกรองแสงและยอมให้แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์ผ่านเท่านั้น โดยสามารถแสดงองค์ประกอบของระบบลำแสงแม่โครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ ได้ดังรูปที่ 2.10

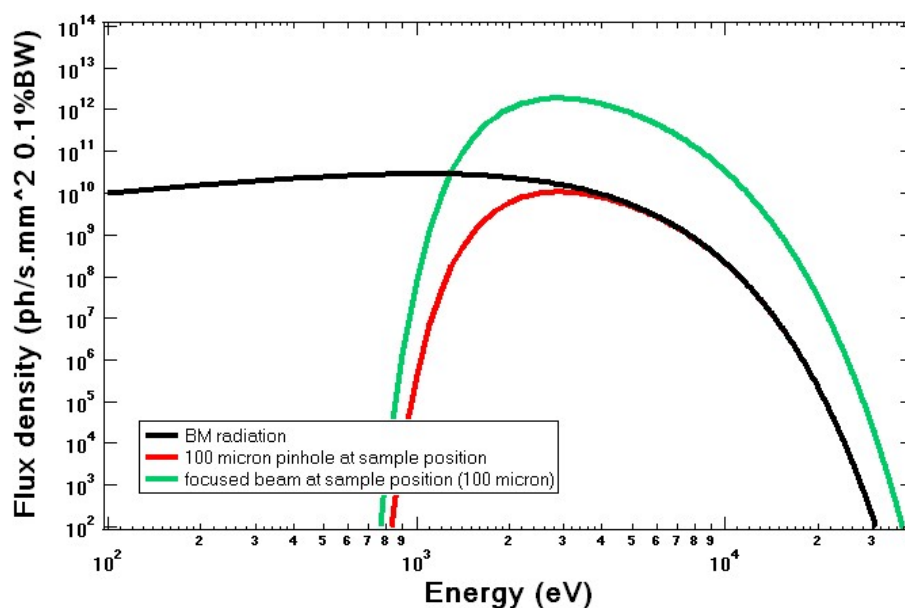


รูปที่ 2.10 แผนผังของระบบลำแสงที่ 6 สำหรับเทคนิค micro-XRF

ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) (2563)

ระบบลำแสงแม่โครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์นี้ จะใช้แสงซินโครตรอนจากแม่เหล็กสองขั้ว (Bending magnet; BM) ซึ่งจะให้แสงซินโครตรอนตามเส้นสีดำ ดังรูปที่ 2.11 โดยแสงซินโครตรอนจะครอบคลุมพลังงานตั้งแต่รังสีอินฟราเรดไปจนถึงรังสีเอกซ์ (แกน y จะเป็นความหนาแน่นของแสงซินโครตรอน (Flux Density)) เมื่อผ่าน Beryllium Window แสงซินโครตรอนจะถูกกรองให้เหลือเฉพาะย่านรังสีเอกซ์เท่านั้น ดังเส้นสีแดงที่แสดงในรูปที่ 2.11 และที่ตำแหน่งที่เป็นสถานีทดลอง BL6b: Micro-XRF แสงซินโครตรอนจะถูกโฟกัสด้วยเลนส์รังสีเอกซ์ ซึ่งเป็นชนิดที่เรียกว่า

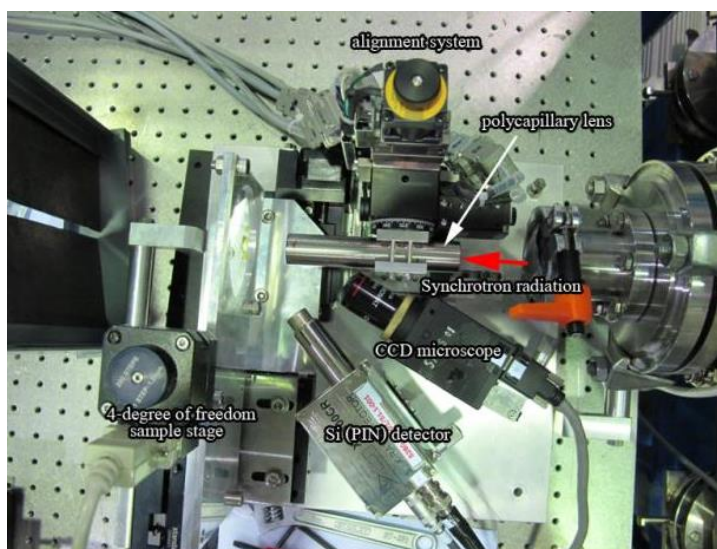
Polycapillary Half Lens และจะให้แสงที่จุดโฟกัส หรือตำแหน่งตัวอย่างมีขนาด  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  ดังเส้นสีเขียวในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบลำเลียงแสงที่ 6  
ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) (2563)

สถานีทดลอง micro-XRF ประกอบด้วย 4 ส่วนสำคัญ (แสดงในภาพที่ 2.12) ได้แก่

- 1) เลนส์รังสีเอกซ์ (Polycapillary Lens) โดยจะติดตั้งอยู่บนระบบ Alignment เนื่องจากต้องการความแม่นยำสูง
- 2) กล้องไมโครสโคป (CCD Microscope) สำหรับตรวจสอบและบันทึกภาพตัวอย่างก่อนและขณะทำการทดลอง
- 3) ระบบจับยึดตัวอย่าง (Sample Stage) โดยตัวอย่างจะสามารถเลื่อนซ้ายขวาตั้งฉากกับแสงเพื่อทำการศึกษาการกระจายตัวของธาตุในตัวอย่าง
- 4) ระบบวัดรังสี ณ สถานีทดลอง คือ Si(PIN) Detector ซึ่งมีค่า Energy Resolution ที่ 160 eV ณ ตำแหน่ง Mn-K $\alpha$  line



รูปที่ 2.12 สถานีทดลอง micro-XRF ของห้องปฏิบัติการแสงสยาม  
ที่มา: สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) (2563)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้พืชในการดูดซับและสะสมโลหะหนัก

Stonehouse et al. (2020) ทำการศึกษาการดูดซับและสะสมซิลิเนียมด้วยเฮมพ์ (*Cannabis sativa*) โดยเริ่มเพาะปลูกเมล็ดเฮมพ์ลงในกระถาง ซึ่งแต่ละกระถางมีการเติมซิลิเนียมที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 40, 80, 160 และ 320 ไมโครโมล ผลการทดลองพบว่า การเติมสารซิลิเนียมในปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมจะสามารถช่วยเพิ่มมวลชีวภาพให้กับเฮมพ์ได้ ซึ่งในการทดลองครั้งนี้พบว่า ปริมาณซิลิเนียมที่เหมาะสมที่เฮมพ์สามารถดูดซับสะสมได้ คือ 40 ไมโครโมล ซึ่งเป็นชุดการทดลองที่เฮมพ์สามารถสะสมซิลิเนียมได้สูงที่สุด และมีมวลชีวภาพสูงที่สุด

Juel et al. (2018) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของหญ้าเนเปียร์ (*Pennisetum purpureum*) และผักกาดเขียวปลี (*Brassica juncea*) ในการบำบัดตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนัก ได้แก่ โครเมียม ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี ผลการทดลองพบว่า หญ้าเนเปียร์และผักกาดเขียวปลีมีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้แตกต่างกัน โดยผักกาดเขียวสามารถสะสมโครเมียมได้สูงที่สุด รองลงมาคือ ทองแดง ตะกั่ว และ สังกะสี ตามลำดับ ในขณะที่หญ้าเนเปียร์สามารถดูดซับสะสมสังกะสีและโครเมียมได้สูงที่สุด จากการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่า หญ้าเนเปียร์และผักกาดเขียวปลี มีศักยภาพในการบำบัดตะกอนปนเปื้อนโลหะหนัก

Kersten et al. (2016) ทำการศึกษาการบำบัดแหล่งน้ำปนเปื้อนแคดเมียมและตะกั่ว บนเทือกเขาร็อกกี ด้วยพืชต่างชนิดกัน ได้แก่ ต้น *Salix drummondiana* ต้น *Salix monticola* และต้น *Salix planifolia* จากการศึกษาพบว่า ต้น *Salix monticola* มีความทนทานต่อตะกั่วที่ ระดับ

ความเข้มข้นสูง และเจริญเติบโตได้ดี จึงจัดได้ว่าเหมาะสมในการนำมาใช้กำจัดตะกั่ว โดยที่ต้น *Salix drummondiana* และต้น *Salix planifolia* มีการสะสมแคดเมียมได้ในปริมาณสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ต้น *Salix drummondiana* ที่มีการสะสมแคดเมียมในลำต้นสูงกว่า ต้น *Salix monticola* และ ต้น *Salix planifolia* ถึง 2.5 เท่า

(Goswami and Das, 2015) ทำการศึกษาศักยภาพในการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียมด้วย ต้น Indian Mustard (*Brassica juncea*) ทำการทดลองโดยปลูกพืชลงในกระถางซึ่งมีการเติมแคดเมียมลงในแต่ละกระถางที่ปริมาณความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 0, 25, 50, 100, 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของแคดเมียมที่สูงขึ้นจะส่งผลให้พืชเกิดความ เป็นพิษและมีการเจริญเติบโตต่ำลง โดยชุดการทดลองที่เติมแคดเมียม 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มี ปริมาณน้ำหนักแห้งของ ต้น Indian Mustard สูงที่สุด คือ 5.67 กรัม และชุดการทดลองที่เติม แคดเมียม 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็นชุดการทดลองที่ ต้น Indian Mustard มีปริมาณน้ำหนัก แห้งต่ำที่สุด คือ 1.372 กรัม แต่เมื่อพิจารณาด้านการสะสมแคดเมียมใน ต้น Indian Mustard พบว่า ชุดการทดลองที่เติมแคดเมียม พืชมีการสะสมแคดเมียมสูงที่สุด

### 2.7.2 งานวิจัยด้านการศึกษาศาสตร์เลตในการบำบัดโลหะหนักด้วยพืช

Ukiwe and Aneke (2010) ทำการทดสอบความสามารถในการสะสมโลหะหนักในปริมาณ สูงของต้นผักตบชวา โดยใช้สารอิตีทีเอในการช่วยเพิ่มปริมาณการสะสม ทำการทดลองปลูกผักตบชวา ในภาชนะปลูก ซึ่งในแต่ละชุดการทดลองมีการเติมเกลือในปริมาณที่แตกต่างกัน (3, 4, 5 และ 6 กรัม) จากนั้นเติมโลหะสังเคราะห์ ได้แก่ ตะกั่ว นิกเกิล เหล็ก สังกะสี ทองแดง โครเมียม โคบอลต์ และ แคดเมียม ผลการทดลองพบว่า ผักตบชวาสามารถดูดดึงสะสมทองแดงได้สูงที่สุด (12.8395 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในขณะที่นิกเกิลถูกดูดซึมน้อยที่สุด (3.4420 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในทุกชุดการทดลอง สำหรับชุดควบคุม ซึ่งเติมเกลือ 6 กรัม แต่ไม่เติมสารอิตีทีเอ พบว่า ต้นผักตบชวาสามารถดูดดึง ทองแดงได้เพียง 13 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ชุดการทดลองที่เติมเกลือร่วมกับสารอิตีทีเอสามารถดูดดึง ทองแดงได้มากกว่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 99, 79, 62 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับปริมาณเกลือ จึงสรุปได้ ว่า การเติมสารอิตีทีเอสามารถช่วยเพิ่มปริมาณการสะสมโลหะในผักตบชวาได้จริง แต่การเติมปริมาณ เกลือที่มากเกินไปจะเป็นการลดประสิทธิภาพการสะสมโลหะในผักตบชวา นอกจากนี้ชนิดของโลหะ ยังเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อปริมาณการสะสม จากการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่ปลูกผักตบชวา สามารถสะสมโลหะได้สูงที่สุดคือ ชุดการทดลองที่เติมเกลือ 3 กรัม ร่วมกับการเติมสารอิตีทีเอ และ ผักตบชวาสามารถสะสมทองแดงได้สูงที่สุดในทุกชุดการทดลอง

Santos et al. (2006) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของสารอิตีทีเอ ในการเพิ่มความสามารถ ในการดูดดึงสะสม แคดเมียม สังกะสี และ ตะกั่ว ใน ต้น *Brachiaria decumbens* ผลการศึกษา



พบว่า สารอิตีทีเอมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดตั้งสะสมแคดเมียม สังกะสี และ ตะกั่ว ในพืชได้ สูงกว่าชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่า สารอิตีทีเอมีความสามารถในการช่วยให้พืชเคลื่อนย้ายโลหะหนัก ขึ้นไปสะสมยังส่วนเหนือดิน นอกจากนี้ยังพบว่า ต้น *Brachiaria decumbens* มีการเจริญเติบโตบน ดินปนเปื้อนโลหะหนักได้ดี โดยไม่แสดงความเป็นพิษจากโลหะหนัก อีกทั้งยังมีความทนต่อโลหะหนัก ได้ดี และมีมวลชีวภาพสูง

### 2.7.3 งานวิจัยประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนในการบำบัดโลหะหนัก

เอกชา ตนานนท์ชัย (2561b) ทำการศึกษาการสะสมและการกระจายตัวของสารแคดเมียม ในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ได้แก่ ส่วนปลายราก (Root Tip) ส่วนราก (Root) ส่วนโคนลำ ต้น (Trunk Base) ส่วนกลางลำต้น (Middle Trunk) และส่วนใบ (Leaves) โดยทำการวิเคราะห์ด้วย ลำแสงซินโครตรอน เทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (Synchrotron Radiation X-Ray Fluorescence; SR-XRF) ผลการทดลองพบว่า เทคนิคดังกล่าวไม่สามารถทำการตรวจวัดการสะสม ของแคดเมียมได้ เนื่องจากพลังงานกระตุ้นอิเล็กตรอนของแสงซินโครตรอนไม่สามารถกระตุ้น อิเล็กตรอนในชั้น K ของแคดเมียมได้ และเมื่อทดลองกระตุ้นอิเล็กตรอนในชั้น L พบว่า กราฟเกิดการ ซ้อนทับกับตำแหน่งกราฟของอาร์กอน จึงทำให้การศึกษการกระจายตัวของแคดเมียมในหญ้าเน เปียร์แคระครั้งนี้ไม่ประสบความสำเร็จ หากแต่ในการวิเคราะห์สามารถพบธาตุชนิดอื่นที่มีระดับความ เข้มข้นสูง เช่น แคลเซียม โพแทสเซียม และอื่น ๆ เป็นต้น

มนทิรา สุขเจริญ (2559) ทำการศึกษาการกระจายตัว การส่งผ่าน และการสะสมแคดเมียม ในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ โดยใช้แสงซินโครตรอน เทคนิค Micro-XRF/XRD ผลการ ทดลองพบว่า ลำแสงซินโครตรอนนั้นไม่สามารถวัดการสะสมของแคดเมียมได้ เนื่องจากความเข้มข้น ของแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระมีปริมาณความเข้มข้นต่ำ แต่สามารถตรวจพบการ กระจายตัวของธาตุชนิดอื่น ได้แก่ อาร์กอน แคลเซียม คลอรีน และโพแทสเซียม โดยแคลเซียมเป็น ธาตุที่มีปริมาณความเข้มข้นสูงที่สุด ซึ่งแคลเซียมมีการสะสมมากที่สุดในส่วนลำต้น รองมาคือ ใบ > ราก ตามลำดับ

Nanthavong (2012) ได้ทำการศึกษาผลของสารเอนทีเอ (NTA) และสารอิตีทีเอ ต่อการดูด ตั้งสารหนูที่ปนเปื้อนในดินด้วยต้นไมยราบ โดยมีการใช้แสงซินโครตรอน เทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออ เรสเซนส์ มาศึกษาการกระจายของสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของพืช ผลการวิเคราะห์พบว่า ไม่สามารถ ตรวจพบรูปแบบการกระจายของสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของพืชได้ เนื่องจากข้อจำกัดด้านเครื่องมือ และระดับความเข้มข้นของสารหนูในตัวอย่างที่ต่ำเกินไป

Nakbanpote et al. (2010) ได้ทำการศึกษาการสะสมแคดเมียมและสังกะสีของต้นว่าน มหาภาพที่ปลูกในระบบเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ และทำการศึกษาการกระจายตัวแคดเมียมและสังกะสีใน

ส่วนต่าง ๆ ของพืชด้วยระบบแสงซินโครตรอน เทคนิคไมโครเอกซ์เลย์ฟลูออเรสเซนส์ ผลการศึกษาพบว่า ต้นว่านมหากาฬมีการส่งผ่านสังกะสีและแคดเมียมจากส่วนรากขึ้นไปยังส่วนหัว และส่งผ่านไป ตามท่อลำเลียงและไปสะสมยังลำต้นและใบ โดยพบว่า แคดเมียมและสังกะสี มีการสะสมบริเวณชั้น คอร์เท็กซ์เป็นส่วนใหญ่ และสะสมน้อยในเนื้อเยื่อบริเวณแกนกลางลำต้นและเนื้อเยื่อลำเลียง



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการทดลองในครั้งนี้เป็นการศึกษาผลของสารอิตีทีเอต่อการดูดตั้งแคดเมียมในดินปนเปื้อนด้วยการปลูกเฮมพ์ โดยมีรายละเอียดของวิธีดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

#### 3.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูล ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานศึกษาทั้งในประเทศและต่างประเทศ ได้แก่ ข้อมูลด้านพฤกษศาสตร์ของเฮมพ์ งานวิจัยเกี่ยวกับการนำเฮมพ์มาแปรรูปเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม งานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เฮมพ์เพื่อบำบัดสารพิษในดิน งานวิจัยด้านการใช้สารคีเลตอิตีทีเอ และงานวิจัยด้านการศึกษาแสงซินโครตรอน เป็นต้น

#### 3.2 สถานที่ทำการทดลอง

3.2.1 การดำเนินการได้ทำการทดลองและศึกษาในโรงเรือนทดลองชั้น 2 และทำการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ห้องปฏิบัติการชั้น 3 ของอาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.2 การวิเคราะห์ด้วยแสงซินโครตรอน (Synchrotron) โดยการนำตัวอย่างพืชไปวิเคราะห์ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน); Synchrotron Light Research Institute (Public Organization)

#### 3.3 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการเพาะปลูกเฮมพ์

- 1) เมล็ดเฮมพ์ (*Cannabis sativa* L.)
- 2) ถูงพลาสติกสีดำที่กันอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง
- 3) ดินสำหรับเพาะปลูก
- 4) บัวรดน้ำพลาสติก
- 5) น้ำประปา
- 6) ซ้อนพรวนดิน
- 7) ส้อมพรวนดิน
- 6) โรงเรือนเพาะชำ ขนาดกว้าง 4 เมตร ยาว 6 เมตร และ สูง 3 เมตร
- 7) ตาชั่งน้ำหนัก

### 3.3.2 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างดินและพืช

- 1) ถุงพลาสติกมีซิปล สำหรับใส่ตัวอย่าง
- 2) ซ้อนพรวนดิน
- 3) น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water; DI)
- 4) ตะกร้า
- 5) ปากกาเคมี
- 6) ฉลากสำหรับติดฉลากบรรจุตัวอย่าง

### 3.3.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- 1) เครื่องแก้วสำหรับวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ
  - (1) ปิเปต (Pipet)
  - (2) ปีกเกอร์ (Beaker)
  - (3) กรวยกรอง (Funnel)
  - (4) แท่งแก้ว (Glass Rod)
  - (5) กระบอกตวง (Cylinder)
  - (6) กระจกนาฬิกา (Watch Glass)
  - (7) ขวดปรับปริมาตร (Volumetric Flask)
- 2) กระจกพรอยด์
- 3) โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 4) ขวดพลาสติกสำหรับบรรจุตัวอย่าง
- 5) กระจกกรองเบอร์ 40 (Whatman, England)

### 3.3.4 เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

- 1) เครื่องบดตัวอย่างพืช (Blender) รุ่น RT04A, Korea
- 2) ตู้อบความร้อน (Hot Air Oven) รุ่น ULE 500, MEMMERT
- 3) เตาแผ่ความร้อน (Hot Plate)
- 4) ตู้ดูดควันสารเคมี (Chemical Flame Hood) รุ่น Wiwatsan
- 5) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter) รุ่น Sension2, HACH
- 6) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC Meter) รุ่น Sension2, HACH
- 7) เครื่องวัดความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP Meter) รุ่น Sension2, HACH
- 8) เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance) พิกัด 220

รุ่น BP 221S, Sartorius สำหรับชั่งน้ำหนักตัวอย่าง และชั่งน้ำหนักสารเคมี

9) เครื่องมือสำหรับย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion)

10) เครื่องอินดักทีฟพลาสมา ออปติคอลลอิมิสชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Inductively

Coupled Plasma–Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)) รุ่น PQ 9000 Elite

### 3.3.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

1) กรดไนตริก (65% HNO<sub>3</sub>)

2) กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

3) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

4) อีดีทีเอไดโซเดียมซอลท์ (EDTA-disodium salt; Na<sub>2</sub>EDTA.2H<sub>2</sub>O)

## 3.4 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

### 3.4.1 การเตรียมดินทดลอง

การเตรียมดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินที่ขุดมาจากพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยแบ่งดินออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ 1) ชุดดินที่ 1 (0.56 มิลลิกรัม/กิโลกรัม แคดเมียม) จากแปลงนา พิกัด 47Q 0456192 UTM 1844114 และ 2) ชุดดินที่ 2 (37.68 มิลลิกรัม/กิโลกรัมแคดเมียม) จากแปลงนา พิกัด 47Q 0456263 UTM 1843176 ทำการขุดและเก็บตัวอย่างดินโดยการสุ่มกระจายให้ทั่วแปลง โดยสุ่มเก็บแบบซิกแซก (Zig-Zag Pattern) ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร นำตัวอย่างดินดังกล่าวมาทำการศึกษาในโรงเรียนทดลอง ซึ่งก่อนทำการทดลองได้ทำการวิเคราะห์สมบัติดินเบื้องต้น ได้แก่ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์แก่พืช (Available Phosphorus) ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์แก่พืช (Available Potassium) ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เนื้อดิน (Soil Texture) ค่าการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้า (Electrical Conductivity) และปริมาณแคดเมียมทั้งหมด จากนั้นเตรียมตัวอย่างดินใส่ลงในภาชนะพลาสติกหรือกระดาษ ปริมาณกระดาษละ 10 กิโลกรัม

### 3.4.2 การเตรียมพืชทดลอง

การเตรียมพืชโดยทำการเพาะปลูกต้นเฮมพ์ (*Cannabis sativa* L.) ลงในกระดาษ ด้วยการทำร่องโรยเมล็ดพันธุ์ที่มีความลึกประมาณ 1.5-2 เซนติเมตร ภายหลังจากโรยเมล็ดแล้วทำการกลบด้วยดินพอประมาณ อย่ากลบดินหนาเกินไปเพราะจะมีผลกระทบต่อรากของต้นอ่อน เมื่อดันเฮมพ์มีอายุอยู่ในช่วง 10-15 วันหลังปลูก ทำการถอนแยกบริเวณที่มีต้นเฮมพ์ขึ้นหนาแน่นเกินไปออก และมีการกำจัดวัชพืชเพื่อช่วยให้ต้นเฮมพ์เจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ เพื่อไม่ให้เป็นแหล่งสะสมโรคและ

แมลง และทำการรดน้ำพองประมาณ วันละ 1 ครั้ง โดยดำเนินการปลูก 120 วัน ตามข้อมูลจาก งานวิจัยของสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (สวพส.) (องค์กรมหาชน)

### 3.4.3 การเตรียมสารเคมี

การเตรียมสารอีดีทีเอ เตรียมจากสารประกอบอีดีทีเอไดโซเดียมซอลท์ (EDTA-disodium salt;  $\text{Na}_2\text{EDTA}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) โดยอัตราส่วนแคดเมียมต่อสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:1 จะทำการเตรียมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 0.00034 โมลต่อกิโลกรัมดิน หรือคิดเป็นสัดส่วนความเข้มข้นเท่ากับ 0.1127 กรัมต่อกิโลกรัมดิน และสำหรับอัตราส่วนแคดเมียมต่อสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:2 จะเตรียมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้น 0.00068 โมลต่อกิโลกรัมดิน หรือคิดเป็นสัดส่วนความเข้มข้นเท่ากับ 0.2254 กรัมต่อกิโลกรัมดิน

### 3.4.4 การเตรียมชุดการทดลอง

การศึกษาผลของอีดีทีเอต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดดึงแคดเมียมโดยเฮมพ์ ประกอบด้วยชุดการทดลองทั้งหมด 4 ชุด โดยแต่ละชุดการทดลองทำ 3 ซ้ำ ดังต่อไปนี้

- 1) ชุดควบคุมดินไม่ปนเปื้อน คือ ชุดการทดลองที่ปลูกเฮมพ์ เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตของเฮมพ์ในสภาวะปกติ ทั้งหมดจำนวน 12 กระถาง
- 2) ชุดควบคุมดินปนเปื้อนแคดเมียม คือ ชุดการทดลองที่ปลูกเฮมพ์ในดินปนเปื้อน เพื่อใช้เป็นชุดเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ ทั้งหมดจำนวน 12 กระถาง
- 3) ชุดการทดลองดินปนเปื้อนแคดเมียม และมีการเติมสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:1 ร่วมกับการปลูกเฮมพ์ ทั้งหมดจำนวน 12 กระถาง
- 4) ชุดการทดลองดินปนเปื้อนแคดเมียม และมีการเติมสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:2 ร่วมกับการปลูกเฮมพ์ ทั้งหมดจำนวน 12 กระถาง

### 3.4.5 ระยะเวลาทำการทดลอง

ทำการทดลองเป็นระยะเวลาทั้งหมด 120 วัน (4 เดือน) โดยเก็บตัวอย่างดินและพืช (ราก เปลือก แกน และใบ) ที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน ของการทดลอง โดยปฏิบัติการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

### 3.4.6 บันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต (RGR)

ทำการบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต (มวลชีวภาพ) และหาอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate; RGR) ในช่วงเวลาหนึ่งๆ ซึ่งหาได้จากสูตรดังต่อไปนี้ (Hunt et al., 2002)

$$\text{RGR} = [\text{Ln}(W_2) - \text{Ln}(W_1)] / (t_2 - t_1)$$

เมื่อ	RGR	=	อัตราการเจริญเติบโต (กรัมต่อวัน)
	$W_1$	=	น้ำหนักแห้งของพืชที่เวลาเริ่มทดลอง (กรัม)
	$W_2$	=	น้ำหนักแห้งของพืชที่เวลาหลังทดลอง (กรัม)
	$t_1$	=	เวลาเริ่มทดลอง (วัน)
	$t_2$	=	เวลาหลังทดลอง (วัน)
	Ln	=	Natural logarithm

### 3.4.7 การเก็บตัวอย่างดินและพืช

การเก็บตัวอย่างดินและพืช ได้ทำการเก็บตัวอย่างพร้อมกัน หลังจากทำการปลูกพืชได้ที่ระยะเวลา 30 60 90 และ 120 วัน โดยทำการสุ่มตัวอย่างแบบง่าย (Simple Random Sampling) และแบ่งตัวอย่างพืชออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ราก เปลือก แกน และใบ

### 3.4.8 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

#### 1) การวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในพืช

เก็บตัวอย่างพืชและล้างตัวอย่างพืชให้สะอาดด้วยน้ำประปាក่อน 3-4 ครั้ง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น 1 ครั้ง ทำการประกันคุณภาพพืชทดลอง ด้วยการเก็บตัวอย่างน้ำกลั่นไปวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมอีกครั้ง และพบว่าปริมาณแคดเมียมในน้ำกลั่น เท่ากับ 0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากนั้นนำพืชมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เมื่อตัวอย่างพืชแห้งนำมาชั่งน้ำหนักสด และบันทึกข้อมูล โดยได้มีการแบ่งตัวอย่างพืชออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ราก ต้น และใบ ในวันที่ 30 และ 60 วัน และแบ่งพืชทดลองออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ราก เปลือก (เส้นใย) แกน และใบ ในวันที่ 90 และ 120 วัน จากนั้นนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบแล้วชั่งน้ำหนักแห้งแล้วทำการบดแบบแยกส่วนให้ละเอียด และจึงนำตัวอย่างพืชที่ผ่านการบดมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด ด้วยวิธีการตาม USEPA method 3052 (USEPA., 1996) โดยการย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) และหาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด ด้วยเครื่องอินดักทีฟพลาสมาสเปกโตรมิเตอร์ (Inductively Coupled Plasma Spectrometer; ICPS)

โดยการประกันคุณภาพจากผลการวิเคราะห์ ด้วยการเติมสารละลายมาตรฐานแคดเมียมที่เข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ทราบปริมาตรจำนวน 200 ไมโครลิตร ลงในเบลนค์ และตัวอย่าง

ทดสอบ และทำการย่อยด้วยเครื่องไมโครเวฟ ตามวิธีการของ USEPA method 3052 ซึ่งจะได้เปอร์เซ็นต์แคดเมียมกลับคืน (%Recovery) ในช่วง 85.5-95.13 เปอร์เซ็นต์

## 2) การวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในดิน

เก็บตัวอย่างดินและแบ่งตัวอย่างดินออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม USEPA method 3051A (USEPA., 2007) โดยการย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) และหาปริมาณแคดเมียมทั้งหมด ด้วยเครื่องอินดักทีฟพลาสมา (Inductively Coupled Plasma Spectrometer; ICPS) และส่วนที่สองนำมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร นำไปวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (Electro Conductivity) และศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation Reduction Potential; ORP) โดยใช้ pH-Meter, EC Meter และ ORP Meter ตามลำดับ

### 3.4.9 การวิเคราะห์สารเสพติด (THC)

ตัวอย่างเสมหะในเดือนที่ 3 และ 4 นำมาทำการวิเคราะห์สารเสพติด (THC) ด้วย THC test kit เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตขึ้นโดยสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) ร่วมกับกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ โดยเป็นวิธีการที่ใช้หลักการแยกสารด้วยวิธี Thin Layer Chromatography และวิเคราะห์ด้วยการละลายตัวอย่างเสมหะที่บดละเอียด โดยทำการใส่ตัวอย่างที่บดแล้วประมาณ 1 กรัม ลงในขวดพลาสติกใส่ตัวอย่าง จากนั้นเติมน้ำยาสกัดตัวอย่าง KC1 จำนวน 10 มิลลิลิตร เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ 5-10 นาที จากนั้นดูดสารละลายใส่ด้านบนจำนวน 1 มิลลิลิตร ลงในขวดแก้ว ใช้ไมโครแคปิลลารีปริมาตร 2 ไมโครลิตร ดูดสารสกัดแล้วค่อย ๆ หยดลงบนจุดที่กำหนดบนแผ่นทดสอบแล้วทิ้งให้แห้ง นำแผ่นทดสอบที่ Spot ตัวอย่างแล้ว วางบนเตาที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที แล้วทิ้งให้เย็นจึงค่อยนำแผ่นทดสอบใส่ในขวดที่บรรจุน้ำยา KC2 (ระดับน้ำยาสูงประมาณ 0.5 เซนติเมตร) ปิดฝาให้สนิทแล้วตั้งทิ้งไว้แล้วรอให้น้ำยาแยกสารขึ้นไปถึงระดับที่กำหนดบนแผ่นทดสอบ แล้วนำแผ่นทดสอบออกจากขวดมาวางทิ้งไว้ให้แห้ง เตรียมน้ำยาทำให้เกิดสี โดยตักสาร KC3 ปริมาณ 1 ซ้อน ใส่ลงในขวดเตรียม KC3 เติมน้ำยา KC4 ประมาณ 20 มิลลิลิตร เขย่าให้ละลายแล้วเทลงภาชนะพลาสติก จุ่มแผ่นทดสอบในน้ำยาทำให้เกิดสี และนำขึ้นทันทีแล้วสังเกตตำแหน่ง (hRf) ขนาดและความเข้มสีของจุด (Spot) บนแผ่นทดสอบ โดยเทียบขนาดและความเข้มสีของจุด (Spot) กับแผ่นเทียบสารมาตรฐาน THC หากขนาดและความเข้มสีของจุด (Spot) บนแผ่นทดสอบมากกว่าจุด Cut Off แสดงว่าตัวอย่างเป็นที่น่าสงสัย และต้องนำส่งตรวจเพื่อยืนยันผลที่ได้อีกครั้งที่



ห้องปฏิบัติการสำนักยาและวัตถุเสพติด กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ โดยใช้ส่วนกิ่งและใบของพืชเพื่อทำการวิเคราะห์แบบ In House Method ด้วยเครื่องลิควิดโครมาโทกราฟีแมสส์สเปกโตรเมตรี (Liquid Chromatograph-Mass Spectrometer; LC-MS)

#### 3.4.10 การวิเคราะห์และทดสอบความเป็นพิษของพืช

ตัวอย่างพืช ได้แก่ ส่วนเปลือก (เส้นใย) และแกนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ นำมาทำการประเมินความเสี่ยงจากความเป็นพิษของแคดเมียมต่อต้านเฮมพ์ ในช่วงที่สามารถนำต้นเฮมพ์มาใช้ประโยชน์ (90 และ 120 วัน) ด้วยวิธีการเผาให้เป็นเถ้า (Dry Ashing หรือ Dry Oxidation) ซึ่งเป็นการเผาที่อุณหภูมิสูงในบรรยากาศของออกซิเจน เพื่อให้สารอินทรีย์สลายตัวออกไปจนเหลือเป็นเถ้าและละลายด้วยกรดที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของสารประกอบแคดเมียมสู่ภายนอกส่วนของเฮมพ์ที่นำมาใช้วิเคราะห์ความเป็นพิษ ได้แก่ เส้นใยและแกนของเฮมพ์ โดยนำพืชมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปาแล้วตามด้วยน้ำกลั่น จากนั้นผึ่งให้แห้ง ลอกเปลือกออกจากแกนของเฮมพ์แล้วนำทั้ง 2 ส่วนมาตัดเป็นท่อนสั้น ๆ ประมาณ 0.5-1 เซนติเมตร แล้วทำการชั่งน้ำหนักสด นำตัวอย่างที่ตัดเป็นชิ้นแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง หลังผ่านการอบแล้วนำมาชั่งตัวอย่างเฮมพ์ 1 กรัม เเทลงในบีกเกอร์แบบทนความร้อน แล้วนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง เพื่อให้กลายเป็นเถ้าขาว จากนั้นเติมสารละลายผสมระหว่างกรดไนตริกกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราส่วน 2 ต่อ 1 ลงในเถ้า ผสมและทำให้แห้งด้วยความร้อนต่ำ กวนเป็นครั้งคราวจนได้สารผสมแห้ง ๆ จากนั้นละลายสารผสมที่ได้ด้วยกรดไนตริก 1 มิลลิลิตร จำนวน 3 มิลลิลิตร นำมาปั่นกวนแยกกากแล้วกรองส่วนที่ใส ปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร จึงนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดด้วย เครื่องอินดักทีฟลีคัปเปิลพลาสมาส (Inductively Coupled Plasma Spectrometer; ICPS) (Ivanov et al., 2017)

จากนั้นนำปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดที่วัดได้ มาทำการประเมินความเสี่ยงจากความเป็นพิษของแคดเมียมต่อต้านเฮมพ์ โดยจำแนกตามลักษณะของความเสี่ยงที่เกิดขึ้น ได้แก่ สารพิษที่ไม่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Noncarcinogen) จำแนกความเสี่ยงจากผลรวมของสัดส่วนความเป็นอันตราย (Hazard Quotient; HQ) โดยคิดผลรวมจากดัชนีย่อยความเป็นอันตรายของสารพิษ (Hazard Index; HI) ดังสมการที่ 3.1 และ สารพิษที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Carcinogen) จำแนกความเสี่ยงของโอกาสเกิดโรคมะเร็งได้ จากผลคูณของขนาดที่ได้รับแบบเรื้อรังในแต่ละวัน (CDI) กับค่าศักยภาพในการก่อมะเร็ง (Potential factor; PF) ดังสมการที่ 3.2 โดยการประมวลผลใช้แฟคเตอร์และข้อมูลที่เกี่ยวข้องอ้างอิงตาม USEPA. (2017)

$$\text{ดัชนีย่อยความเป็นอันตรายของสารพิษ} \quad HI = \frac{CDI}{Rfd} \quad 3.1$$

เมื่อ	HI	=	ดัชนีย่อความเป็นอันตรายของสารพิษ
	CDI	=	ขนาดที่ได้รับแบบเรื้อรังในแต่ละวัน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน)
	RfD	=	ปริมาณสารที่ได้รับแล้วตามวิธีที่ระบุตลอดอายุขัย ไม่ทำให้เกิดอันตราย หรือเกิดผลร้ายอย่างใด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน)
	HQ	=	สัดส่วนความเป็นอันตรายจากการได้รับสารต่าง ๆ

$$\text{ความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็ง} \quad R = \text{CDI} * \text{PF} \quad 3.2$$

เมื่อ	R	=	ความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็งจากการได้รับสารพิษ
	CDI	=	ขนาดที่ได้รับแบบเรื้อรังในแต่ละวัน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมต่อวัน)
	PF	=	ค่าศักยภาพของการเกิดมะเร็ง

#### 3.4.11 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแสงซินโครตรอน

ทำการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ และการกระจายตัวของแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของต้นแฮมพ์ ได้แก่ ราก เปลือก (เส้นใย) แกน และใบ ที่ระยะเวลา 120 วัน โดยการใช้แสงซินโครตรอน (Synchrotron) ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence; XRF) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในตัวอย่าง โดยอาศัยความแตกต่างของชั้นพลังงานของธาตุแต่ละชนิด เมื่อทำการกระตุ้นอะตอมด้วยการให้พลังงานที่มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นใน อะตอมจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า "การเรืองรังสีเอกซ์" จึงสามารถนำปรากฏการณ์นี้ไปใช้ในการหาชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างได้ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ยังมีข้อดีหลายประการคือ มีการเตรียมตัวอย่างที่ไม่ยุ่งยาก และเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายคุณสมบัติของตัวอย่าง (Non-Destructive Method) ในกระบวนการวิเคราะห์จะใช้รังสีเอกซ์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการคายพลังงานของอะตอมในตัวอย่าง และเนื่องจากแสงซินโครตรอนมีความเข้มสูง จึงทำให้สามารถกำหนดลำรังสีเอกซ์ให้มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรได้ ซึ่งเหมาะกับการหาองค์ประกอบของธาตุที่บริเวณเล็ก ๆ บนตัวอย่าง และยังสามารถศึกษาการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ได้อีกด้วย

### 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลปริมาณการดูดติ่ง และสะสมแคดเมียมที่ได้จากการทดลองปลูกเหมพ์ในดินปนเปื้อน โดยใช้ One Way Anova เพื่อหาความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's New Multiple Rang Test (DMRT) ทั้งนี้จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติตั้งกล่าวโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติคือ Statistical Package for the Social Science (SPSS) Version

22



## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาผลของสารอีทีทีเอต่อการดูดดึงแคดเมียมในดินที่ปนเปื้อนด้วยการปลูกเฮมพ์ ได้ทำการแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดควบคุมที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_1$ ) 2) ชุดควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_2$ ) 3) ชุดการทดลองดินปนเปื้อนแคดเมียมร่วมกับการเติมสารอีทีทีเอในอัตราส่วน 1:1 โมล ( $T_1$ ) และ 4) ชุดการทดลองดินปนเปื้อนแคดเมียมร่วมกับการเติมสารอีทีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 120 วัน และมีการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของดินทดลอง

จากการสำรวจพื้นที่และเก็บตัวอย่างดินจากแปลงนาของเกษตรกรทั้ง 17 แปลง ครั้งที่ 1 สามารถแสดงปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในดินได้ ดังตารางที่ 4.1 เมื่อทราบผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในดินของแต่ละแปลงนา จึงทำการคัดเลือกและออกเก็บตัวอย่างดิน ครั้งที่ 2 เพื่อทำการวิเคราะห์และยืนยันปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในดินอีกครั้ง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ ครั้งที่ 2 พบว่า ตัวอย่างดินจากแปลงนา ลำดับที่ 4 (47Q 0456192 UTM 1844114) (ตารางที่ 4.1) มีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในดินน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับแปลงนาในตำแหน่งอื่น โดยมีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน เท่ากับ 0.09 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และจากการวิเคราะห์ ครั้งที่ 2 ยังพบว่า ตัวอย่างดินจากแปลงนา ลำดับที่ 13 (47Q 0456263 UTM 1843176) (ตารางที่ 4.1) มีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในดินมากที่สุด เมื่อเทียบกับแปลงนาในตำแหน่งอื่น โดยมีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน เท่ากับ 49.74 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมสูงกว่า 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน จึงเลือกเป็นพื้นที่ที่ควรได้รับการบำบัดและฟื้นฟูการปนเปื้อน ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ จึงได้เลือกใช้ดินจากแปลงนา ลำดับที่ 4 เพื่อเป็นตัวแทนของชุดดินที่ 1 ดินมีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมต่ำ และเลือกดินจากแปลงนา ลำดับที่ 13 เป็นตัวแทนของชุดดินที่ 2 ดินมีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมสูง โดยทำการขุดมาทำการทดลองในโรงเรือนทดลอง

ภายหลังทำการสำรวจพื้นที่และเก็บตัวอย่างดินทดลองจากแปลงนาของเกษตรกร ตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ได้แบ่งตัวอย่างดินออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ 1) ชุดดินที่ 1 และ 2) ชุดดินที่ 2 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของดินทดลอง ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในดิน จากการสำรวจแปลงนาของเกษตรกร ครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2

ลำดับ ที่	พิกัดจุดเก็บตัวอย่าง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
		ปริมาณแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
1	47Q 0455769 UTM 1845066	1.20	3.47
2	47Q 0456569 UTM 1844338	0.70	0.21
3	47Q 0464351 UTM 1842641	1.00	-
4	47Q 0456192 UTM 1844114	0.50	0.09
5	47Q 0456341 UTM 1843830	4.80	8.06
6	47Q 0456676 UTM 1843761	4.50	1.28
7	47Q 0465066 UTM 1842767	0.70	-
8	47Q 0459366 UTM 1843053	6.49	-
9	47 Q0459362 UTM 1842987	30.79	-
10	47Q 0459340 UTM 1843218	6.74	-
11	47Q 0464735 UTM 1842666	28.25	-
12	47Q 0456233 UTM 1843178	33.80	20.65
13	47Q 0456263 UTM 1843176	47.73	49.74
14	47Q 0464701 UTM 1842675	1.20	-
15	47Q 0464345 UTM 1842607	1.23	-
16	47Q 0456500 UTM 1842993	23.82	19.54
17	47Q 0456553 UTM 1842905	31.69	33.51

หมายเหตุ: เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่มีข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในดิน

#### 4.1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของชุดดินที่ 1

จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของชุดดินที่ 1 จากแปลงนาลำดับที่ 4 พบว่า ดินมีลักษณะเป็นดินร่วน (Loam) เมื่อวิเคราะห์ธาตุอาหารหลัก พบว่า ดินมีปริมาณ

ไนโตรเจน เท่ากับ 0.06 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม เท่ากับ 17.20 และ 44.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ปริมาณจุลธาตุในดิน ได้แก่ เหล็ก มีค่าเท่ากับ 1.04 เปอร์เซ็นต์ แมงกานีส สังกะสี และทองแดง มีค่าเท่ากับ 140.33, 49.00 และ 9.86 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีปริมาณแคดเมียมเพียง 0.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ค่าความเป็นกรด-ด่างในดิน มีค่าเท่ากับ 7.82 สภาพการนำไฟฟ้า เท่ากับ 0.17 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน เท่ากับ 153.27 มิลลิโวลต์ ค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวก เท่ากับ 14.27 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และดินมีปริมาณสารอินทรีย์ เท่ากับ 1.29 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ตารางที่ 4.2)

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของดินทดลอง

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วิเคราะห์ได้	
	ชุดดินที่ 1	ชุดดินที่ 2
เนื้อดิน	ดินร่วน	ดินร่วนปนทราย
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	7.82	7.48
ค่าการนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	0.17	0.22
ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)	153.27	216.23
การแลกเปลี่ยนไอออนบวก (เซนติโมลต่อกิโลกรัม)	14.27	15.48
ปริมาณสารอินทรีย์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1.29	2.83
ไนโตรเจน (เปอร์เซ็นต์)	0.06	0.14
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	17.20	11.90
โพแทสเซียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	44.70	61.60
แคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	0.56	37.68
เหล็ก (เปอร์เซ็นต์)	1.04	1.93
แมงกานีส (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	140.33	620.33
สังกะสี (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	49.00	51.76
ทองแดง (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	9.86	18.53

#### 4.1.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของชุดดินที่ 2

สำหรับผลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของชุดดินที่ 2 จากแปลงนา ลำดับที่ 13 พบว่า ดินปนเปื้อนแคดเมียมมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทราย (Sandy Loam) มีปริมาณแคดเมียม เท่ากับ 37.68

มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดินที่กำหนดไว้ให้มีค่าการปนเปื้อนแคดเมียมได้ไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ดินปนเปื้อนแคดเมียมยังมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7.48 สภาพการนำไฟฟ้า เท่ากับ 0.22 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน เท่ากับ 216.23 มิลลิโวลต์ ค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวก เท่ากับ 15.48 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และมีปริมาณสารอินทรีย์ เท่ากับ 2.83 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับธาตุอาหารในดิน พบว่า มีปริมาณไนโตรเจน 0.1415 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม เท่ากับ 11.90 และ 61.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ จุลธาตุได้แก่ เหล็ก มีค่าเท่ากับ 1.93 เปอร์เซ็นต์ แมงกานีส สังกะสี และทองแดง มีค่าเท่ากับ 620.33, 51.76 และ 37.68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2)

จากผลการวิเคราะห์ดินตัวอย่างสามารถสรุปได้ว่า ชุดดินทดลองทั้งสองชุดที่กล่าวมาข้างต้น เนื้อดินมีความเหมาะสมต่อการเพาะปลูก และค่าความเป็นกรด-ด่างของทั้งสองชุดดินไม่เป็นผลกระทบทางลบต่อการเติบโตของพืช สำหรับค่าการนำไฟฟ้าของชุดดินทั้งสอง แสดงให้เห็นได้ว่าดินไม่มีความเค็มที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพืช โดยค่ามาตรฐานระดับความเค็มของดินที่เป็นอุปสรรคต่อการเติบโตของพืชนั้นต้องมีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า 4 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (Jones, 1999) สำหรับความอุดมสมบูรณ์ดินของชุดดินที่ 1 พบว่า ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุค่อนข้างต่ำ ต่างจากชุดดินที่ 2 ที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุค่อนข้างสูง โดยระดับอินทรีย์วัตถุที่ควรมีในดินควรมีค่าสูงกว่า 1.5 ร้อยละโดยน้ำหนัก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) และจากการวิเคราะห์ค่าธาตุอาหารหลักของชุดดินทั้งสองยังพบว่า มีปริมาณธาตุอาหารหลักอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง ซึ่งปริมาณธาตุอาหารหลักในดินที่เพียงพอต่อความต้องการของพืชนั้นควรมีปริมาณไนโตรเจนมากกว่า 0.10 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณฟอสฟอรัสมากกว่า 11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณโพแทสเซียมมากกว่า 61 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ภรภัทร สุชาติกุล, 2560)

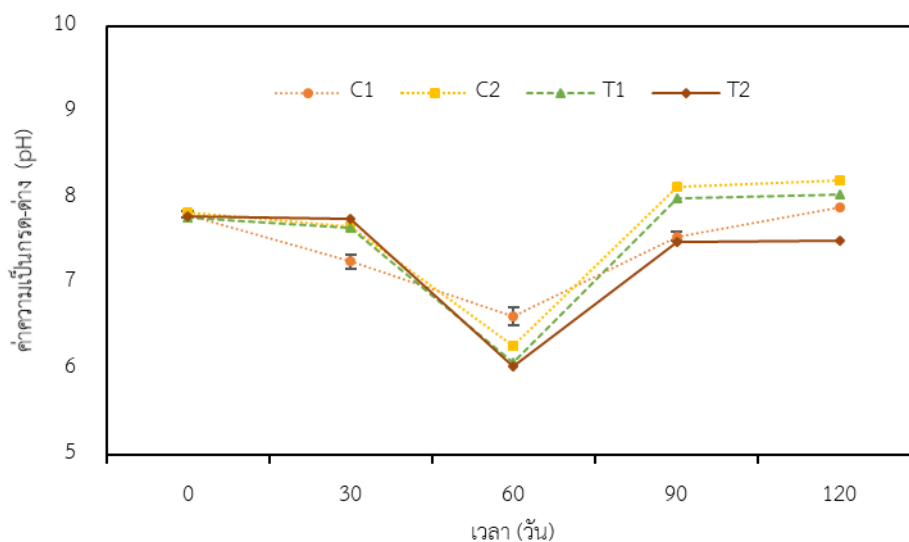
#### 4.2 ลักษณะทางเคมีของดินตัวอย่างภายหลังทำการทดลอง

##### 4.2.1 ความเป็นกรด-ด่างของดิน (Potential of Hydrogen ion; pH)

ทำการวิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่างของดินในวันเริ่มต้น (วันที่ 0) พบว่า ดินมีความเป็นกรด-ด่างของดิน อยู่ในช่วง 7.78-7.83 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $7.81 \pm 0.03$ ,  $7.83 \pm 0.08$ ,  $7.78 \pm 0.06$  และ  $7.78 \pm 0.04$  ตามลำดับชุดการทดลอง จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างดินทุกวันที่ 30, 60, 90 และ 120 วันผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน พบว่า ทุกชุดการทดลอง ( $C_1$ - $C_2$ - $T_1$ - $T_2$ ) มีแนวโน้มค่าความเป็นกรด-ด่างของดินลดลงไปจนถึง 60 วัน หลังจากนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาทำการทดลอง โดยค่าความเป็นกรด-ด่างของทุกชุดการทดลองที่

ระยะเวลา 30 วัน อยู่ในช่วง 7.26-7.76 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $7.26 \pm 0.04$ ,  $7.66 \pm 0.03$ ,  $7.65 \pm 0.09$  และ  $7.76 \pm 0.06$  ตามลำดับชุดการทดลอง (รูปที่ 4.1) จากนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเริ่มมีแนวโน้มลดลง เมื่อทำการเก็บตัวอย่างดินทดลองที่ระยะเวลา 60 วัน พบว่า ทุกชุดการทดลองมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 6.03-6.61 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $6.61 \pm 0.09$ ,  $6.28 \pm 0.10$ ,  $6.08 \pm 0.06$  และ  $6.03 \pm 0.13$  ตามลำดับชุดการทดลอง และค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากระยะเวลาที่ 60-120 วัน โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (120 วัน) พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินจากทุกชุดการทดลอง อยู่ในช่วง 7.50-8.20 หรือมีค่าเฉลี่ย  $7.89 \pm 0.06$ ,  $8.20 \pm 0.04$ ,  $8.04 \pm 0.10$  และ  $7.50 \pm 0.14$  ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินในช่วงระยะเวลาที่ 0-60 วัน มีค่าลดลงนั้นอาจเนื่องมาจาก ในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นฤดูฝนที่มีฝนตกชุกทำให้ดินมีความชื้นสูง ซึ่งอาจส่งผลให้ธาตุที่มีไฮโดรเจนเป็นสารประกอบเกิดการละลายน้ำและแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) จึงทำให้ดินมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น (ศิริภาณี วงศ์กระจ่าง, 2557) และเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นกรด-ด่างในดินมีแนวโน้มสูงขึ้นนั้นเป็นผลมาจากเฮมพ์เริ่มมีการเจริญเติบโตเต็มวัยและเริ่มมีการสร้างเส้นใย รวมถึงสารประกอบต่าง ๆ ในเซลล์มากขึ้น ดังนั้นเฮมพ์จึงมีความต้องการธาตุอาหารสูง และจากการรวมตัวกันของสารอิตีทีเอกับแคตไอออนของแคดเมียม จึงทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งเป็นสารละลายที่ง่ายต่อการถูกดูดซับด้วยพีช และทำให้เฮมพ์สามารถดูดซับแคดเมียมในสารละลายดินได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ในสารละลายดินสูงขึ้น (ทิพวรรณ พจนานภรณ์, 2552) ดังนั้น ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินจึงมีแนวโน้มสูงขึ้นตามระยะเวลาของการทดลองจาก 60-120 วัน นอกจากนี้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินตลอดระยะเวลาทำการทดลอง อยู่ในช่วง 6.03-8.20 ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเหมาะสมต่อการปลูกเฮมพ์ โดยค่าความเป็นกรด-ด่างของดินที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกเฮมพ์ควรอยู่ระหว่าง 6.0-7.5 (สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง, 2559) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yanai et al. (2005) ที่ทำการทดลองปลูก *Thlaspi caerulescens* บนดินปนเปื้อนแคดเมียมที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการปลูกพีชบนดินปนเปื้อนแคดเมียม อยู่ในช่วง 5-6 ซึ่งช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างดังกล่าว พีชศึกษามีการเติบโตที่ดีและสามารถสะสมแคดเมียมได้ในปริมาณสูงสุด



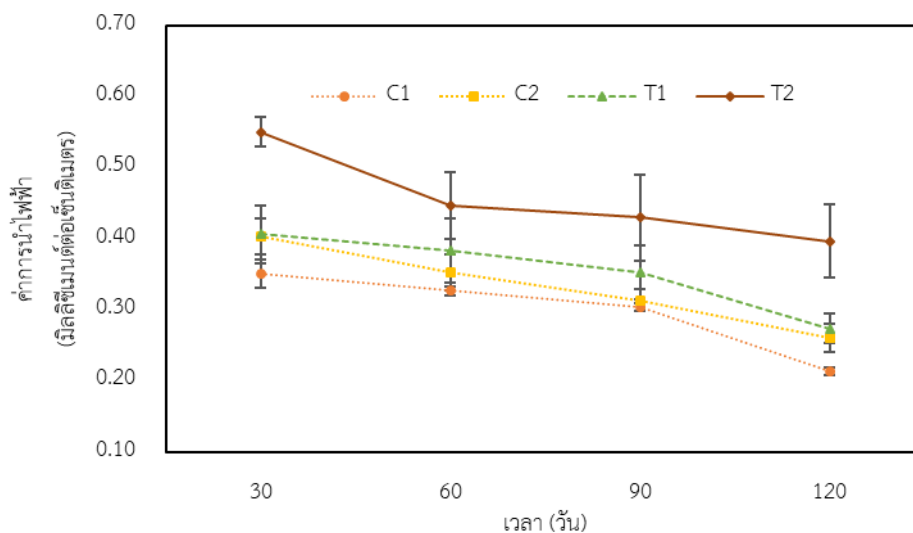


รูปที่ 4.1 ความเป็นกรด-ด่างของดินทดลอง

#### 4.2.2 การนำไฟฟ้าของดิน (Electrical Conductivity; EC)

จากการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าของดินทดลองเพื่อศึกษาความเค็ม (Salinity) ที่อาจมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยได้ทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 30, 60, 90 และ 120 วัน (รูปที่ 4.2) พบว่า ทุกชุดการทดลอง ( $C_1$ - $C_2$ - $T_1$ - $T_2$ ) มีแนวโน้มค่าการนำไฟฟ้าของดินลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่ระยะเวลา 30 วัน อยู่ในช่วง 0.35-0.55 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.35 \pm 0.02$ ,  $0.40 \pm 0.03$ ,  $0.41 \pm 0.04$  และ  $0.55 \pm 0.02$  มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับชุดการทดลอง และที่ระยะเวลา 120 วัน ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าต่ำสุด อยู่ในช่วง 0.21-0.40 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.21 \pm 0.01$ ,  $0.26 \pm 0.02$ ,  $0.27 \pm 0.02$  และ  $0.40 \pm 0.05$  มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับชุดการทดลอง และจากการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าของดินตลอดระยะเวลาทำการทดลองทั้งหมด อยู่ในช่วง 0.21-0.55 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ดินไม่มีความเค็มที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพืช และเหตุที่ค่าการนำไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้มีแนวโน้มลดลงนั้น เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้ามีความผกผันตามค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ลดการละลายของธาตุบางชนิดลง ทำให้ดินมีสารละลายลดลงซึ่งทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงเช่นกัน นอกจากนี้ การดูดตั้งไอออนบวกที่มีปฏิกิริยาเป็นกรดหรือแคดเมียมไอออนของพืช ยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง (Salimi et al., 2012; Sampanpanish and Pinpa, 2018) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าของดินจากทุกชุดการทดลอง พบว่า ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) มีค่าการนำไฟฟ้าตลอดระยะเวลาทำการทดลองสูงสุด รองลงมาคือ

$T_1 > C_2 > C_1$  ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์ที่เื้อทำหน้าที่รวมตัวกับสารประกอบต่าง ๆ ภายในดิน และช่วยไม่ให้ธาตุต่าง ๆ เหล่านั้นเกิดการตกตะกอน จึงยังคงอยู่ในรูปของสารละลายได้นาน และส่งผลให้ดินมีประจุบวกเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นเช่นกัน (Ebrahimi, 2016)

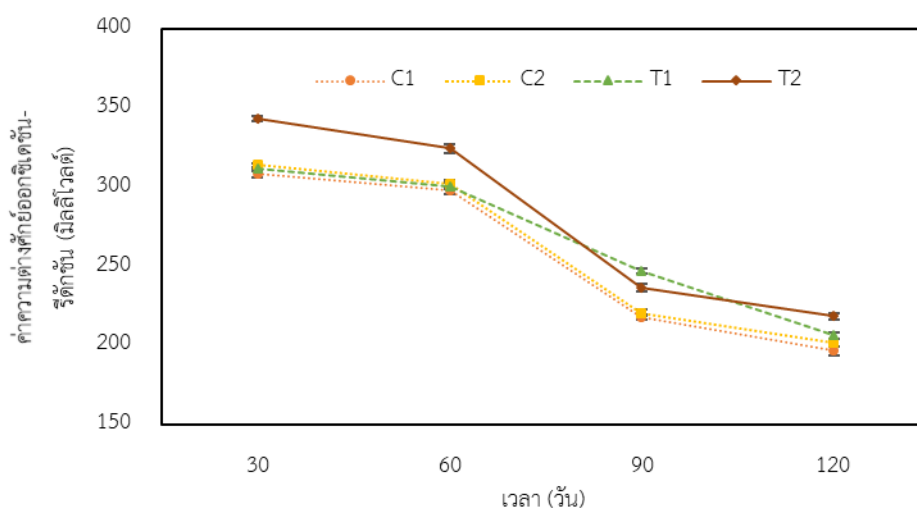


รูปที่ 4.2 ค่าการนำไฟฟ้าของดินทดลอง

#### 4.2.3 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential; ORP)

ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน จากการเก็บตัวอย่างดินทดลองในระยะเวลาที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน เพื่อวิเคราะห์ พบว่า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันมีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของทุกชุดการทดลอง ( $C_1$ - $C_2$ - $T_1$ - $T_2$ ) มีค่าสูงสุดที่ระยะเวลา 30 วัน อยู่ในช่วง 308.53-343.33 มิลลิโวลต์ หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $308.53 \pm 2.24$ ,  $314.27 \pm 1.25$ ,  $312.00 \pm 0.72$  และ  $343.33 \pm 1.53$  มิลลิโวลต์ ตามลำดับชุดการทดลอง (รูปที่ 4.3) และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (120 วัน) พบว่า ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน อยู่ในช่วง 196.97-218.77 มิลลิโวลต์ หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $196.97 \pm 2.85$ ,  $202.03 \pm 2.57$ ,  $206.53 \pm 2.14$  และ  $218.77 \pm 2.15$  มิลลิโวลต์ ตามลำดับชุดการทดลอง สำหรับสาเหตุที่ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก พีชทดลองหรือเฮมพ์มีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น และต้องการปริมาณธาตุอาหารมากขึ้น จึงมีการดูดดึงธาตุอาหารรวมถึงสารละลายแคดเมียม ส่งผลทำให้ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน มีค่าลดลงเช่นเดียวกับค่าการนำไฟฟ้า (พันธวัศ สัมพันธ์พานิช, 2556) และเมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลอง ชุดควบคุมที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_1$ ) กับชุดการทดลองที่ดินมีการปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_2$ ,  $T_1$  และ  $T_2$ ) พบว่า ชุดการทดลองที่ดินมีการปนเปื้อนแคดเมียมจะมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันสูงกว่าชุดดินที่ไม่ปนเปื้อนแคดเมียม

โดยเฉพาะชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) นั้น เป็นชุดการทดลองที่ดินมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันสูงที่สุด รองลงมาคือ  $T_1 > C_2 > C_1$  ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Good et al. (2011) และ Tananonchai and Sampanpanish (2014) ที่พบว่า เมื่อแคดเมียมละลายจะเกิดการแตกตัวเป็นแคดเมียมไดวาเลนต์ ( $Cd^{2+}$ ) ซึ่งมีบทบาทเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังนั้น การเติมสารอีดีทีเอจึงมีส่วนในการเพิ่มค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันให้สูงขึ้น



รูปที่ 4.3 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินทดลอง

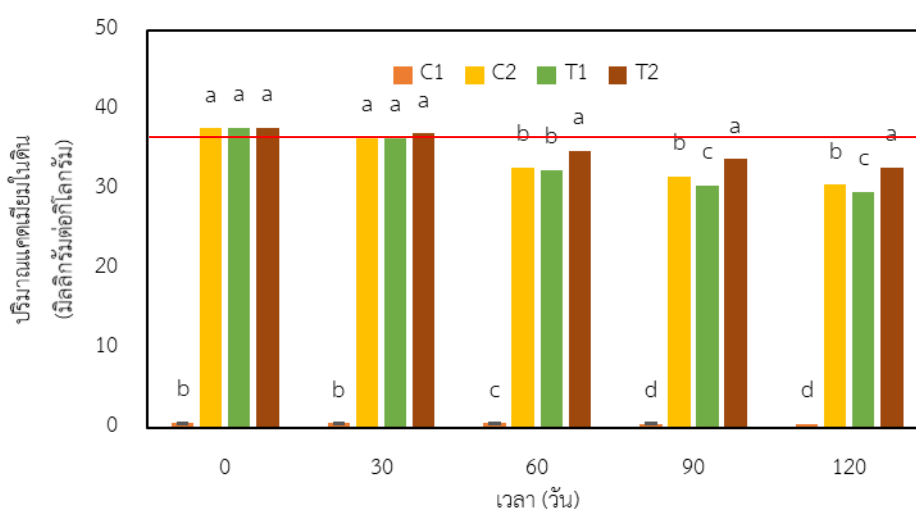
#### 4.2.4 ผลของสารอีดีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในดินทดลอง

จากการศึกษาผลของสารอีดีทีเอต่อการดูดซับสะสมแคดเมียมด้วยเฮมพ์ โดยได้ทำการทดลองปลูกเฮมพ์ลงในภาชนะปลูกที่บรรจุดิน 10 กิโลกรัมต่อภาชนะ ซึ่งประกอบไปด้วยทั้งหมด 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดควบคุมที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_1$ ) ชุดควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_2$ ) ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:1 โมล ( $T_1$ ) และ ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมของดินในวันเริ่มต้น (วันที่ 0) พบว่า มีปริมาณแคดเมียมสะสมในดิน อยู่ในช่วง 0.58-37.78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.58 \pm 0.01$ ,  $37.72 \pm 0.23$ ,  $37.78 \pm 0.04$  และ  $37.76 \pm 0.20$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับชุดการทดลอง ทำการเก็บตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมสะสมในดินที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน (รูปที่ 4.4) ผลการทดลองพบว่า ทุกชุดการทดลอง ( $C_1$ - $C_2$ - $T_1$ - $T_2$ ) ดินมีแนวโน้มการสะสมแคดเมียมลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น โดยทุกชุดการทดลองมีปริมาณแคดเมียมสะสมในดินสูงสุดที่ระยะเวลา 30 วัน อยู่ในช่วง 0.56-37.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือมี

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.56 \pm 0.01$ ,  $36.51 \pm 0.57$ ,  $36.48 \pm 0.98$  และ  $37.08 \pm 0.19$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับชุดการทดลอง ทั้งนี้พบว่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินของทุกชุดการทดลองมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการทดลอง (120 วัน) พบว่า ทุกชุดการทดลอง ดินมีการสะสมแคดเมียมต่ำที่สุด อยู่ในช่วง  $0.47$ - $32.79$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.47 \pm 0.02$ ,  $30.59 \pm 0.43$ ,  $30.03 \pm 0.56$  และ  $32.79 \pm 0.57$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่า เสมพ์มีประสิทธิภาพในการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ahmad et al. (2016) ที่ทำการวิเคราะห์การสะสมโลหะหนักในเสมพ์ และพบว่า เสมพ์มีประสิทธิภาพในการสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณมาก ทั้งนี้เนื่องเสมพ์เป็นพืชที่มีมวลชีวภาพสูงและเป็นพืชที่มีรากขนไชดินได้ดี อย่างไรก็ตามจากการทดลองยังพบว่า เสมพ์จะมีความสามารถในการดูดดึงสะสมโลหะหนักได้มากขึ้น หากดินมีปริมาณความเข้มข้นของโลหะสูง นอกจากนี้ยังจัดเสมพ์เป็นหนึ่งในพืชกลุ่มไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์ (Hyperaccumulator) (Ahmad et al., 2016) เนื่องจากเป็นพืชที่สามารถสะสมแคดเมียมได้มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และในการทดลองครั้งนี้ เมื่อพิจารณาและเปรียบเทียบชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีดีทีเอ ( $T_1$ - $T_2$ ) กับชุดควบคุมดินปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_2$ ) จะเห็นได้ว่า ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:1 โมล ( $T_1$ ) เป็นชุดการทดลองที่ดินมีปริมาณการสะสมแคดเมียมลดลงสูงที่สุด รองลงมาคือ  $C_2 > T_2$  ทั้งนี้เนื่องจาก สารอีดีทีเอมีประสิทธิภาพในการรวมตัวกับแคดเมียม และทำให้แคดเมียมคงอยู่ในรูปของสารละลายได้นาน ซึ่งเป็นรูปที่ง่ายต่อการถูกดูดดึงด้วยพืช (Gzar and Gatea, 2015) แต่ในทางตรงกันข้าม หากเติมสารอีดีทีเอที่มีปริมาณความเข้มข้นสูงเกินไปจะส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตลดลง หรือพืชแสดงความเป็นพิษ (Phytotoxicity) และทำให้พืชมีประสิทธิภาพในการดูดดึงแคดเมียมหรือธาตุอาหารลดลงเช่นกัน (Farid et al., 2013) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ชุดควบคุมดินปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_2$ ) มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินต่ำกว่า ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) นอกจากการเติมสารคีเลตแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องต่อการดูดดึงและสะสมโลหะหนักในพืช ได้แก่ ชนิดของพืช ความทนทานต่อโลหะหนักของพืช ระดับความเข้มข้นของโลหะหนักในดิน ความสามารถในการละลายของโลหะหนัก และค่าความเป็นกรด-ด่าง ใน ดิน เป็นต้น

จากการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินของชุดการทดลองทั้งหมด พบว่า ทุกชุดการทดลองมีค่าการสะสมแคดเมียมต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดิน ที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่

อาศัยและเกษตรกรรม ซึ่งกำหนดให้มีปริมาณแคดเมียมสูงสุดได้ไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25, 2547) และจากทุกชุดการทดลองทั้งหมด ยังพบว่าชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีทีทีเอ ในอัตราส่วน 1:1 โมล ( $T_1$ ) เป็นชุดการทดลองที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียมสูงสุด และคาดว่าจะมีความเหมาะสมในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมจริงได้



รูปที่ 4.4 ผลของสารอีทีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในดินทดลอง

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างระยะเวลาที่ชุดการทดลองที่ต่างกัน และค่ามาตรฐานแคดเมียมในดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัย และการเกษตรกรรมมีค่าเท่ากับ 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (แทนสัญลักษณ์ — )

#### 4.3 ผลของสารอีทีทีเอต่อการดูดซับและสะสมแคดเมียมในเฮมพ์

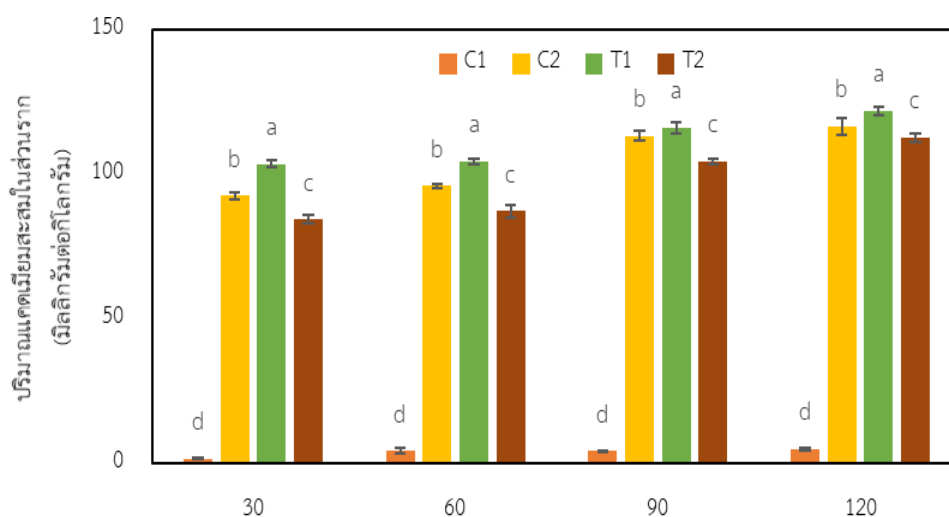
จากการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของเฮมพ์ ได้แก่ ราก ลำต้น ใบ และ เปลือก (เส้นใย) ที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน ของการทดลอง สามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

##### 4.3.1 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในราก

ผลการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมแคดเมียมในราก พบว่า เฮมพ์มีแนวโน้มสะสมแคดเมียมในรากเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาของการทำการทดลอง และทุกชุดการทดลองมีปริมาณการสะสมแคดเมียมในรากแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยผลการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมแคดเมียมในราก ที่ระยะเวลา 30 วัน อยู่ในช่วง 1.69-98.63 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1.69 \pm 0.25$ ,  $92.68 \pm 1.18$ ,  $98.63 \pm 1.12$  และ  $84.48 \pm 1.46$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ตามลำดับชุดการทดลอง ( $C_1-C_2-T_1-T_2$ ) จากนั้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ปริมาณการสะสมแคดเมียมในรากเฮมพ์ก็เพิ่มขึ้น โดยเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาทำการทดลอง (120 วัน) พบว่า รากเฮมพ์มีปริมาณการสะสมแคดเมียม อยู่ในช่วง  $5.08-122.07$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $5.08 \pm 0.59$ ,  $116.55 \pm 2.90$ ,  $122.07 \pm 1.36$  และ  $112.70 \pm 1.43$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่า ปริมาณแคดเมียมในรากเฮมพ์ อยู่ในช่วง  $1.69-122.07$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานแคดเมียมในพืช ที่กำหนดให้พืชมีปริมาณการสะสมแคดเมียมสูงสุดไม่เกิน  $0.2$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Codex, 2006) และจากการศึกษา พบว่า ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:1 โมล เป็นชุดการทดลองที่เฮมพ์สามารถสะสมแคดเมียมในรากได้ปริมาณสูงสุด รองลงมาคือ  $C_2 > T_2 > C_1$  ตามลำดับ (รูปที่ 4.5) แสดงให้เห็นว่า เฮมพ์มีปริมาณการสะสมแคดเมียมได้ในปริมาณที่สูงกว่า  $100$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือมากกว่า  $0.01$  เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง (Chen et al., 2004) จึงสามารถจัดให้เฮมพ์เป็นพืชไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์ (Hyperaccumulator Plant) หรือเป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณสูงเป็นพิเศษ สำหรับการเติมสารอีดีทีเอลงดินทดลอง พบว่า ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:1 โมล ( $T_1$ ) มีประสิทธิภาพดีกว่า ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) อีกทั้งการเติมสารอีดีทีเอที่มีปริมาณความเข้มข้นสูง ยังส่งผลให้พืชมีความสามารถในการสะสมแคดเมียมได้ต่ำกว่า ชุดควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_2$ ) ทั้งนี้เนื่องจาก สารอีดีทีเอมีส่วนช่วยให้เกิดการชะแคดเมียมให้อยู่ในรูปที่เป็นสารละลายดินได้ในปริมาณที่สูงขึ้น และสารอีดีทีเอจะสามารถล้อมประจุบวกของโลหะได้ดีที่สุดในอัตราส่วนโลหะต่อสารอีดีทีเอเท่ากับ 1:1 โมล (Zhou et al., 2011) อีกทั้งการเติมสารอีดีทีเอในปริมาณที่เหมาะสม ยังมีส่วนช่วยในการลดความเป็นพิษของแคดเมียมลงได้ (Mcguigan, 2012) แต่หากเติมสารอีดีทีเอที่มีความเข้มข้นสูงเกินไปก็จะส่งผลให้พืชเกิดความเป็นพิษ มีมวลชีวภาพลดลง และยังสะสมโลหะหนักได้น้อยลงอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Blaylock et al. (1997) ที่ทดลองการบำบัดดินปนเปื้อนตะกั่วด้วย *Brassica juncea* ร่วมกับการเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้นต่างกันคือ 0, 0.1, 1, 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ผลการทดลองพบว่า การเติมสารอีดีทีเอเพียง 1-5 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม สามารถช่วยเพิ่มการละลายของตะกั่วในดินได้ในปริมาณสูง และยังช่วยให้พืชสามารถดูดดึงตะกั่วได้โดยไม่เป็นพิษ ต่างจากการเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้นสูงสุด คือ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม ซึ่งพบว่า การเติมสารอีดีทีเอที่ระดับความเข้มข้นสูงนั้น จะส่งผลให้มีปริมาณสารละลายตะกั่วในดินสูงที่สุด หากแต่กลับส่งผลให้พืชเกิดความเป็นพิษและน้ำหนักมวลชีวภาพลดลงอย่างมากหรืออาจทำให้

พืชตายได้ และจากการศึกษาในครั้งนี่ยังพบว่า ราก เป็นส่วนที่เฮมพ์มีการสะสมแคดเมียมสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับ Guo et al. (2014) ที่ทำการศึกษาผลของสารอดีทีที่เอต่อการบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนัก (แคดเมียม สังกะสี ตะกั่ว และสารหนู) ในพื้นที่เกษตรกรรม ด้วยหญ้าไรย์ (Rye grass) ผลการศึกษาพบว่า สารอดีทีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสังกะสีได้มากที่สุด รองลงมา คือ สารหนู แคดเมียม และตะกั่ว ตามลำดับ โดยหญ้าไรย์ (Rye grass) มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักในรากมากที่สุด และยังมีมวลชีวภาพเพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 ผลของสารอดีทีที่เอต่อการสะสมแคดเมียมในรากเฮมพ์

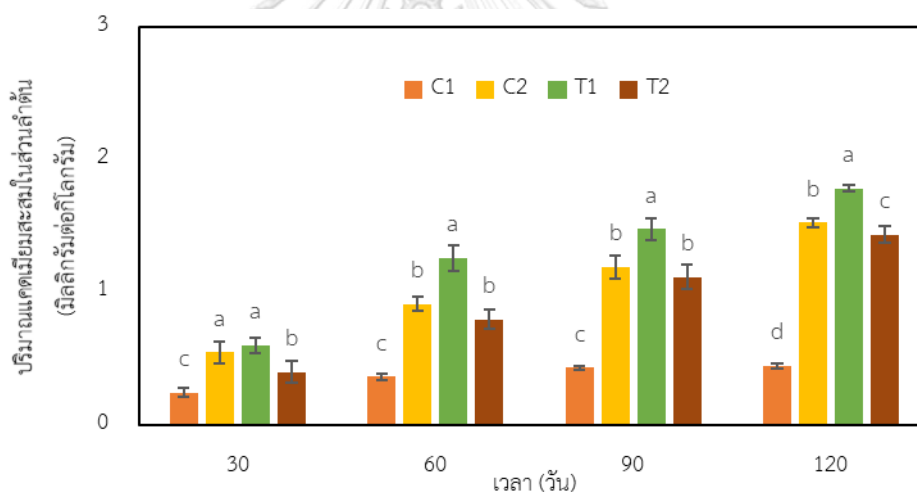
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างระยะเวลาการทดลองที่ต่างกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.3.2 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในลำต้น (แกน)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมแคดเมียมในลำต้น พบว่า เฮมพ์มีการสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น โดยทุกชุดการทดลองที่ดินมีการปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_2-T_1-T_2$ ) มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในลำต้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ และตลอดระยะเวลาทำการทดลอง พบว่า ชุดการทดลองที่มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในลำต้นสูงที่สุด คือ  $T_1 > C_2 > T_2 > C_1$  ตามลำดับ สำหรับการศึกษานี้ เมื่อลำต้นมีอายุได้ 90 ถึง 120 วันของการทดลอง ได้ทำการลอกเปลือกออกจากลำต้นจนเหลือแต่ส่วนแกน แล้วนำแกนมาวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม โดยผลการวิเคราะห์พบว่า ระยะเวลาทำการทดลองที่ 90 วัน มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้น (แกน) เท่ากับ 0.43, 1.19, 1.48 และ 1.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับชุดการทดลอง และเฮมพ์มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในลำต้น (แกน) สูงที่สุดที่ระยะเวลา 120 วัน

โดยมีค่าการสะสมแคดเมียมในลำต้น คือ 0.44, 1.53, 1.78 และ 1.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับชุดการทดลอง (รูปที่ 4.6) ดังนั้นการทดลองในครั้งนี้แสดงให้เห็นได้ว่า เฮอร์มีมีความสามารถในการดูดซับและสะสมแคดเมียม และสามารถลำเลียงแคดเมียมมาสะสมไว้ในส่วนเหนือดินได้บ้าง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Citterio et al. (2003) ที่ทำการทดลองปลูกเฮมพ์บนดินปนเปื้อนโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม นิกเกิล และโครเมียม ผลการทดลองพบว่า การเจริญเติบโตของเฮมพ์หรือสัญญาณวิทยานั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางสถิติ แต่เฮมพ์มีการตอบสนองต่อพิษของโลหะหนัก ด้วยการเพิ่มไฟโทเคเลติน (Phytocheletin) และดีเอ็นเอ (DNA) ในระหว่างการเติบโต จึงทำให้เฮมพ์สามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายของเซลล์จากพิษของแคดเมียม ด้วยการใช้กลไกการสะสมในราก นอกจากนี้ การศึกษาในครั้งนี้ยังพบว่า การเติมสารอิตีทีเอยังมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายแคดเมียมขึ้นไปสะสมยังบริเวณส่วนเหนือดินของเฮมพ์ได้อีกด้วย (Tandy et al., 2006; Weihong et al., 2009)



รูปที่ 4.6 ผลของสารอิตีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในลำต้นเฮมพ์

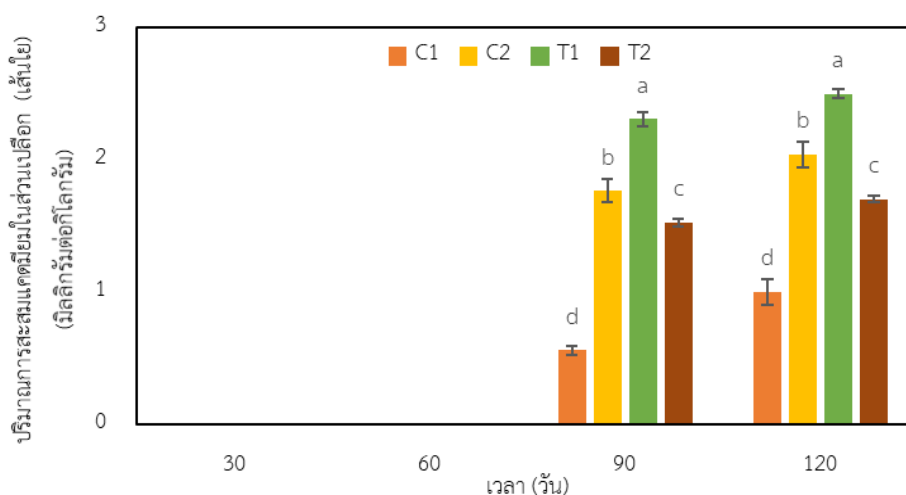
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างระยะเวลาที่ชุดการทดลองที่ต่างกัน

#### 4.3.3 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในเปลือก (เส้นใย)

จากการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์ เฉพาะระยะเวลาที่ 90 และ 120 วัน ทั้งนี้เนื่องจากช่วงระยะเวลาดังกล่าว เป็นช่วงที่เฮมพ์มีการเจริญเติบโตสูง และมีการผลิตเส้นใยที่มีคุณภาพดี จึงทำให้สามารถลอกเปลือก (เส้นใย) ออกจากแกนเฮมพ์ได้ ผลการวิเคราะห์ (รูปที่ 4.7) พบว่า ทุกชุดการทดลอง (C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>-T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>) มีปริมาณการสะสมแคดเมียมใน



ส่วนเปลือก (เส้นใย) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:1 โมล ( $T_1$ ) มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในเปลือก (เส้นใย) สูงที่สุด รองลงมาคือ  $C_2 > T_2 > C_1$  ตามลำดับ โดยที่ระยะเวลา 90 วัน ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนเปลือก อยู่ในช่วง 0.56-2.31 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.56 \pm 0.04$ ,  $1.76 \pm 0.09$ ,  $2.31 \pm 0.05$  และ  $1.53 \pm 0.03$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับชุดการทดลอง นอกจากนี้ผลของการสะสมแคดเมียมในเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์ ที่ระยะเวลา 120 วัน มีค่าการสะสมอยู่ในช่วง 1.00-2.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1.00 \pm 0.10$ ,  $2.04 \pm 0.10$ ,  $2.50 \pm 0.04$  และ  $1.70 \pm 0.02$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามผลของการศึกษาในครั้งนี้ มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Linger et al. (2002) ที่ทำการศึกษาคคุณภาพเส้นใยเฮมพ์ที่ปลูกในดินปนเปื้อนโลหะหนัก ผลการทดลองพบว่า โลหะหนักไม่มีผลต่อคุณภาพเส้นใยเฮมพ์



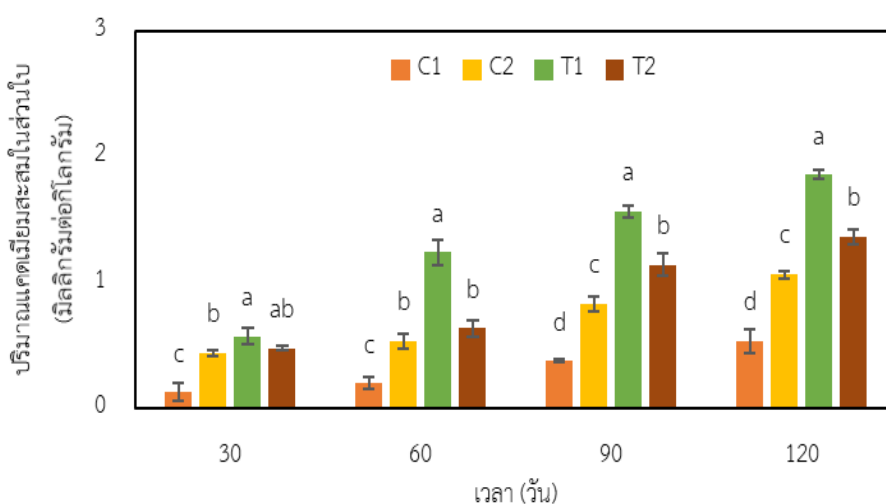
รูปที่ 4.7 ผลของสารอีดีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในเปลือก (เส้นใย) เฮมพ์

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างระยะเวลากับชุดการทดลองที่ต่างกัน

#### 4.3.4 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบ

ผลการศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบเฮมพ์ ที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน ของการทดลอง พบว่า ปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบเฮมพ์ของทุกชุดการทดลอง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) และชุดการทดลองดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:1 โมล ( $T_1$ ) เป็นชุดการทดลองที่ใบเฮมพ์มีปริมาณการสะสมแคดเมียมสูงที่สุด รองลงมาคือ  $T_2 > C_2 > C_1$  ตามลำดับ (รูปที่ 4.8) โดยที่ระยะเวลา 30 วัน พบว่า เฮมพ์มีปริมาณการสะสม

แคดเมียมในใบต่ำที่สุด อยู่ในช่วง 0.13-0.57 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.13 \pm 0.07$ ,  $0.44 \pm 0.03$ ,  $0.57 \pm 0.72$  และ  $0.48 \pm 0.02$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับชุดการทดลอง ( $C_1$ - $C_2$ - $T_1$ - $T_2$ ) จากนั้นปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบเริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาทดลอง โดยที่ระยะเวลา 120 วัน ของการทดลอง พบว่า เหม่มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบสูงสุด อยู่ในช่วง  $0.53 \pm 1.86$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือมีค่าเฉลี่ย  $0.53 \pm 0.10$ ,  $1.07 \pm 0.03$ ,  $1.86 \pm 0.04$  และ  $1.37 \pm 0.06$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับชุดการทดลอง และเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ ( $T_1$ - $T_2$ ) กับชุดควบคุม ( $C_1$ - $C_2$ ) จะเห็นได้ว่า ชุดการทดลองที่เติมสารอีดีทีเอ เหม่มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบสูงกว่าชุดควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Habiba et al. (2014) ที่ทำการศึกษา ผลของสารอีดีทีเอต่อการเจริญเติบโตและการสะสมทองแดงในดินปนเปื้อนด้วยต้นผักกาดก้านขาว (*Brassica napus* L.) ผลการทดลอง พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม พืชที่เจริญเติบโตในชุดดินที่มีการเติมสารอีดีทีเอ มีประสิทธิภาพในการสะสมทองแดงไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืชได้มากกว่าชุดควบคุม และจากการทดลองนี้ยัง พบว่า ต้นผักกาดก้านขาวสามารถสะสมทองแดงได้สูงสุดที่ส่วนราก รองลงมาคือ ลำต้น และใบ ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณการสะสมทองแดงในใบของต้นผักกาดก้านขาว พบว่า ชุดที่เติมสารอีดีทีเอส่งผลให้พืชมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายทองแดงขึ้นมาสะสมบริเวณใบได้มากกว่าชุดควบคุม



รูปที่ 4.8 ผลของสารอีดีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในใบเหม่

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างระยะเวลากับชุดการทดลองที่ต่างกัน

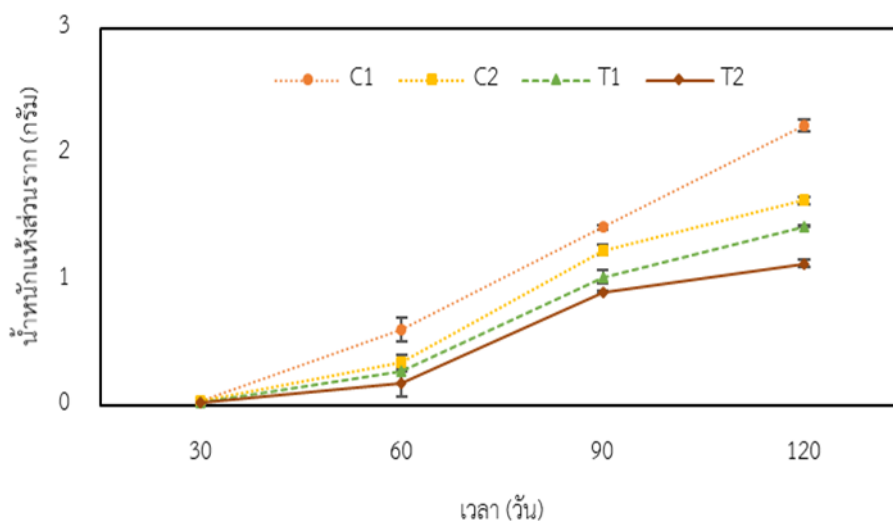
#### 4.4 ผลของสารอีดีทีเอต่อการเจริญเติบโตของเฮมพ์

##### 4.4.1 ผลของสารอีดีทีเอต่อการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนต่าง ๆ ของเฮมพ์

จากการศึกษาการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของเฮมพ์ในวันที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน ที่ได้ทำการบันทึกน้ำหนักของเฮมพ์ในแต่ละส่วน ภายหลังจากนำเฮมพ์ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง และทำการแบ่งเฮมพ์ออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ราก ลำต้น (แกน) เปลือก (เส้นใย) และใบ โดยสามารถแสดงผลการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งได้ดังนี้

##### 1) การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนรากของเฮมพ์

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของรากเฮมพ์ (รูปที่ 4.9) พบว่า น้ำหนักแห้งมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดลอง โดยที่ระยะเวลา 30 วัน รากเฮมพ์มีน้ำหนักน้อยที่สุด อยู่ในช่วง 0.025-0.036 กรัม หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.036 \pm 0.00$ ,  $0.032 \pm 0.01$ ,  $0.030 \pm 0.00$  และ  $0.025 \pm 0.00$  กรัม ตามลำดับชุดการทดลอง ( $C_1$ - $C_2$ - $T_1$ - $T_2$ ) ซึ่งน้ำหนักแห้งส่วนรากที่ระยะเวลา 30 วัน ทุกชุดการทดลองมีน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างกันทางสถิติ และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า น้ำหนักแห้งส่วนรากของเฮมพ์มีน้ำหนักมากที่สุด อยู่ในช่วง 1.127-2.228 กรัม หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $2.228 \pm 0.05$ ,  $1.623 \pm 0.03$ ,  $1.427 \pm 0.01$  และ  $1.127 \pm 0.03$  กรัม ตามลำดับชุดการทดลอง และน้ำหนักแห้งส่วนรากที่ระยะเวลา 120 วัน และมีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ทั้งนี้จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ชุดควบคุมที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_1$ ) เฮมพ์มีการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งสูงที่สุด ในขณะที่ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_2$ - $T_1$ - $T_2$ ) เฮมพ์มีการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งต่ำกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เฮมพ์ที่เติบโตในชุดดินปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีดีทีเอ อัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) มีการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งต่ำที่สุดตลอดระยะเวลาทำการทดลอง (รูปที่ 4.9) ทั้งนี้เนื่องจาก สารอีดีทีเอมีส่วนช่วยให้พืชสามารถดูดดึงโลหะหนักได้ดียิ่งขึ้น และเมื่อพืชมีการสะสมโลหะหนักในปริมาณสูง จึงส่งผลให้พืชชะงักการเจริญเติบโตได้ (จากรูวรรณ วงศ์เนต, 2549) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Grcman et al. (2003) ที่ทำการศึกษาดูดดึงโลหะหนัก 3 ชนิด คือ แคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี ด้วยต้นผักกาดขาว (*Brassia rapa* L.) โดยมีการเติมสารอีดีทีเอ ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับ 5 และ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมดิน ผลการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม พบว่า ต้นผักกาดขาวที่เติบโตในดินปนเปื้อนโลหะหนักและเติมสารอีดีทีเอมีน้ำหนักแห้งต่ำกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ต้นผักกาดขาวที่ปลูกในดินปนเปื้อนโลหะหนักและเติมสารอีดีทีเอ ที่มีปริมาณความเข้มข้น เท่ากับ 10 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมมีน้ำหนักแห้งต่ำที่สุด

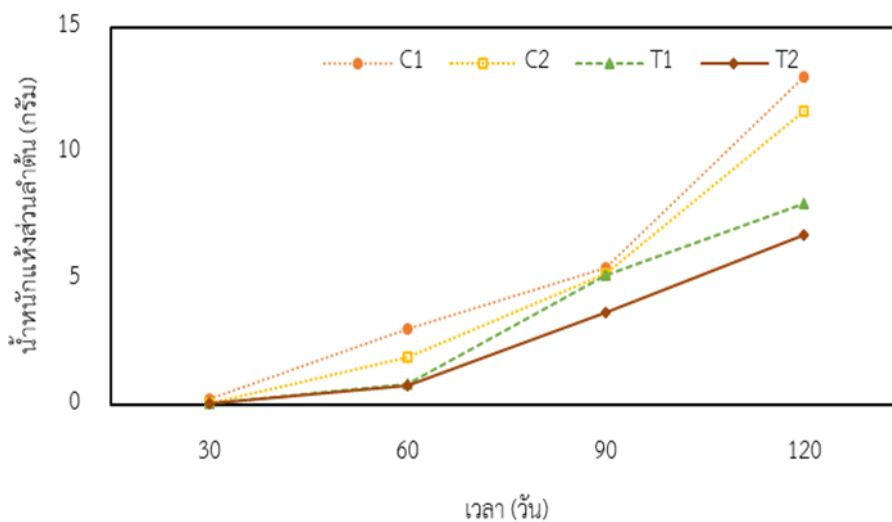


รูปที่ 4.9 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนรากของเฮมพ์

## 2) การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนลำต้นของเฮมพ์

ผลการศึกษการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของลำต้นเฮมพ์ พบว่า น้ำหนักแห้งมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลา 30 วัน ลำต้นของเฮมพ์มีค่าน้ำหนักแห้งน้อยที่สุด อยู่ในช่วง 0.059-0.238 กรัม (รูปที่ 4.10) หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.238 \pm 0.01$ ,  $0.064 \pm 0.02$ ,  $0.061 \pm 0.01$  และ  $0.059 \pm 0.03$  กรัม ตามลำดับชุดการทดลอง ( $C_1$ - $C_2$ - $T_1$ - $T_2$ ) ซึ่งน้ำหนักแห้งของทุกชุดการทดลอง ที่ระยะเวลา 30 วัน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (120 วัน) พบว่า น้ำหนักแห้งส่วนลำต้นของเฮมพ์มีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วง 6.780-13.070 กรัม หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $13.070 \pm 0.76$ ,  $11.713 \pm 0.21$ ,  $8.003 \pm 0.18$  และ  $6.780 \pm 0.31$  กรัม ตามลำดับชุดการทดลอง โดยในแต่ละชุดการทดลองค่าน้ำหนักแห้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า เฮมพ์ในชุดควบคุมที่ 1 คือ ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_1$ ) มีค่าน้ำหนักแห้งสูงกว่าชุดอื่น ๆ และเฮมพ์ที่เติบโตในชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีดีทีเอ อัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) นั้น มีปริมาณน้ำหนักแห้งต่ำที่สุด (รูปที่ 4.10) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Evangelou et al. (2007a) ที่ทำการศึกษา อิทธิพลของสารอีดีทีเอ (EDDS) และสารอีดีทีเอ (EDTA) ต่อการดูดตั้งสะสมแคดเมียมและทองแดงในดินปนเปื้อนด้วยต้นยาสูบ (*Nicotiana tabacum*) ผลการทดลองพบว่า การเติมสารคีเลตสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดตั้งและสะสมโลหะหนักในพืชได้ และยังพบว่า สารอีดีทีเอมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความสามารถในการดูดตั้งและสะสมโลหะหนักในต้นยาสูบสูงกว่าสารอีดีทีเอ และเมื่อพิจารณาด้านน้ำหนักแห้ง พบว่า สารอีดีทีเอสามารถช่วยเพิ่มมวลชีวภาพของต้นยาสูบให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับชุด

ควบคุม หากแต่เมื่อเติมสารอีดีทีเอที่มีปริมาณความเข้มข้นสูงเกินไปนั้น จะส่งผลทำให้มวลชีวภาพของต้นยาสูบลดลง จึงทำให้น้ำหนักแห้งมีปริมาณน้อยลงและมีปริมาณการสะสมโลหะหนักในต้นยาสูบลดลงไปด้วย

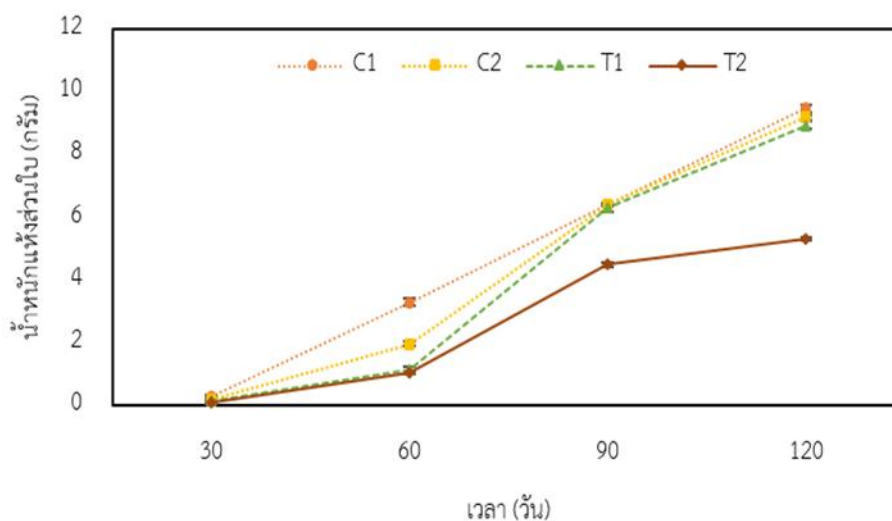


รูปที่ 4.10 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนลำต้นของเฮมพ์

### 3) การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใบของเฮมพ์

ผลการศึกษการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของใบเฮมพ์ พบว่า น้ำหนักแห้งมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาทำการทดลองที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลา 30 วัน น้ำหนักแห้งส่วนใบเฮมพ์มีค่าน้อยที่สุด อยู่ในช่วง 0.103-0.278 กรัม (รูปที่ 4.11) หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.278 \pm 0.09$ ,  $0.203 \pm 0.08$ ,  $0.168 \pm 0.06$  และ  $0.103 \pm 0.05$  กรัม ตามลำดับชุดการทดลอง ( $C_1$ - $C_2$ - $T_1$ - $T_2$ ) ซึ่งน้ำหนักแห้งของทุกชุดการทดลอง ที่ระยะเวลา 30 วัน มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติ และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (120 วัน) พบว่า น้ำหนักแห้งส่วนใบของเฮมพ์มีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วง 5.330-9.479 กรัม หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $9.479 \pm 0.12$ ,  $9.193 \pm 0.09$ ,  $8.943 \pm 0.13$  และ  $5.330 \pm 0.06$  กรัม ตามลำดับของชุดการทดลอง โดยชุดการทดลองดินปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีดีทีเอ อัตราส่วน 1:2 โมล ค่าของน้ำหนักแห้งมีความแตกต่างกับชุดการทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) และจากผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า เฮมพ์ที่เติบโตในชุดควบคุมที่ 1 ได้แก่ ชุดดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_1$ ) พบว่า มีค่าน้ำหนักแห้งสูงกว่าชุดอื่น ๆ และเฮมพ์ที่ปลูกและเติบโตในชุดดินปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีดีทีเอ อัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) นั้น มีปริมาณน้ำหนักแห้งต่ำที่สุด (รูปที่ 4.11) อย่างไรก็ตามผลการศึกษายังพบว่า เมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้น เฮมพ์มีน้ำหนักแห้งในส่วนใบมีค่าและมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liphadzi and Kirkham (2006) ที่ได้

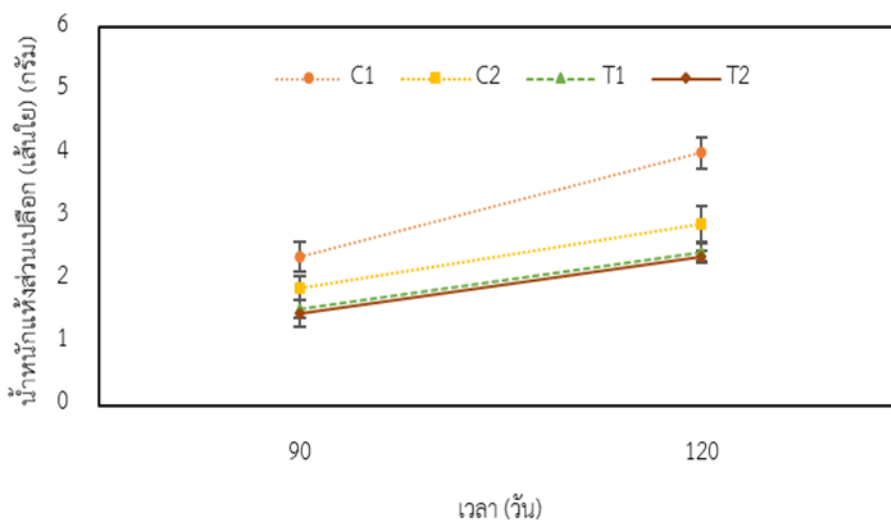
ทำการศึกษาดูตดิ่งโลหะหนัก 7 ชนิด ได้แก่ สังกะสี แคดเมียม ทองแดง เหล็ก แมงกานีส นิกเกิล และ ตะกั่ว ในดินด้วยต้นทานตะวัน (*Helianthus annuus*) ร่วมกับการเติมสารอีทีทีเอระดับความเข้มข้น 0, 1 และ 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยการศึกษาพบว่า สารอีทีทีเอไม่มีความเป็นพิษต่อต้นทานตะวัน และต้นทานตะวันมีมวลชีวภาพเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาทำการทดลอง



รูปที่ 4.11 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใบของเฮมพ์

#### 4) การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์

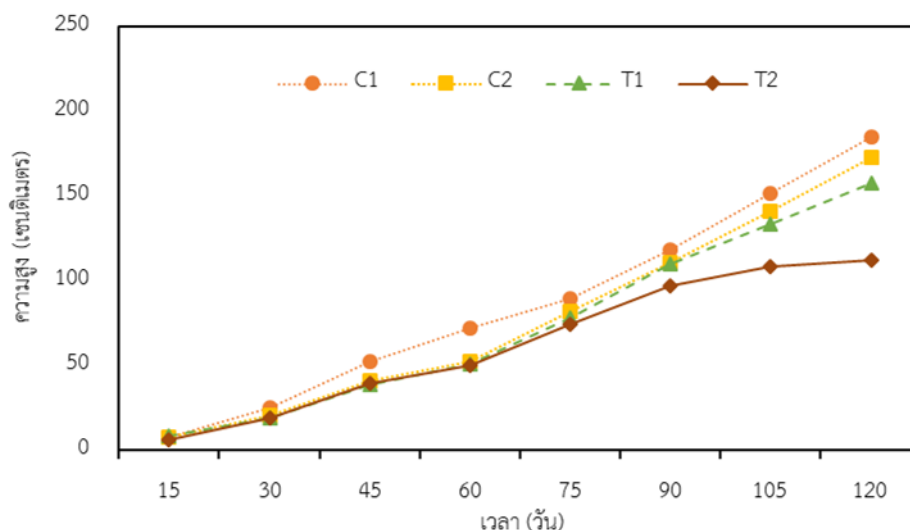
ผลการวิเคราะห์การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของเปลือก (เส้นใย) เฮมพ์ พบว่า น้ำหนักแห้งมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาทำการทดลองที่เพิ่มขึ้น โดยที่ระยะเวลา 90 วัน น้ำหนักแห้งส่วนเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์มีค่าน้อยที่สุด อยู่ในช่วง 1.456-2.360 กรัม (รูปที่ 4.12) หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $2.360 \pm 0.23$ ,  $1.862 \pm 0.20$ ,  $1.536 \pm 0.14$  และ  $1.456 \pm 0.22$  กรัม ตามลำดับชุดการทดลอง ( $C_1$ - $C_2$ - $T_1$ - $T_2$ ) และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (120 วัน) พบว่า น้ำหนักแห้งส่วนเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์มีค่ามากที่สุด อยู่ในช่วง 2.353-4.011 กรัม หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $4.011 \pm 0.24$ ,  $2.888 \pm 0.28$ ,  $2.429 \pm 0.15$  และ  $2.353 \pm 0.10$  กรัม ตามลำดับชุดการทดลอง สำหรับชุดควบคุมที่ 1 คือ ชุดดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_1$ ) ค่าของน้ำหนักแห้งมีความแตกต่างกับชุดการทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) นอกจากนี้จากผลการทดลองในครั้งนี้ยังแสดงให้เห็นได้ว่า เฮมพ์ที่ปลูกและเติบโตในชุดควบคุมที่ 1 คือ ชุดดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียมมีน้ำหนักแห้งสูงกว่าชุดอื่น ๆ และเฮมพ์ที่ปลูกและเติบโตในชุดดินปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีทีทีเอ อัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) โดยพบว่า มีปริมาณน้ำหนักแห้งต่ำที่สุด (รูปที่ 4.12) ทั้งนี้เมื่อระยะเวลาของการทำการทดลองที่เพิ่มขึ้น พบว่า น้ำหนักแห้งของเปลือก (เส้นใย) โดยรวมของเฮมพ์มีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.12 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์

#### 4.4.2 ผลของสารอีตีทีต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงของเฮมพ์

จากการศึกษาการเจริญเติบโตด้านความสูงของเฮมพ์ ที่ได้ทำการเก็บข้อมูลความสูงของเฮมพ์ ทุก ๆ 15 วัน ตั้งแต่วันที่ 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 วัน ของการทดลอง ซึ่งได้ทำการวัดความสูงของเฮมพ์ โดยวัดความสูงจากผิวดินขึ้นไปจนถึงปลายสุดของยอดเฮมพ์ โดยผลการศึกษาพบว่า เฮมพ์มีการเจริญเติบโตด้านความสูงเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาทำการทดลอง โดยชุดควบคุม คือ ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_1$ ) เป็นชุดการทดลองที่เฮมพ์มีการเจริญเติบโตดีที่สุด รองลงมา คือ  $C_2 > T_1 > T_2$  ตามลำดับ (รูปที่ 4.13) ทั้งนี้เนื่องจาก แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษ และหากพืชสะสมแคดเมียมในปริมาณมาก พิษของแคดเมียมจะส่งผลกระทบต่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัณฐานวิทยาหรือสรีรวิทยา ซึ่งในทางสัณฐานวิทยา รายงานว่าปริมาณแคดเมียมที่มีปริมาณมากเกินไปจะส่งผลทำให้พืชชะลอการเจริญเติบโต (Benavides et al., 2005; Liu et al., 2010) จึงทำให้เฮมพ์ที่เจริญเติบโตบนดินปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_2$ - $T_1$ - $T_2$ ) มีการพัฒนาด้านความสูงต่ำกว่าชุดทดลอง  $C_1$  และจากรูปที่ 4.13 ยังแสดงให้เห็นได้ว่า ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียม และมีการเติมสารอีตีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) มีการเจริญเติบโตต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการเติมสารอีตีทีเอในปริมาณความเข้มข้นสูงเกินไปอาจเป็นพิษต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยจะเป็นการลดมวลชีวภาพของพืชให้ลดลง และอาจทำให้พืชเจริญเติบโตได้ไม่ดีเท่าที่ควร (Hadi et al., 2014)

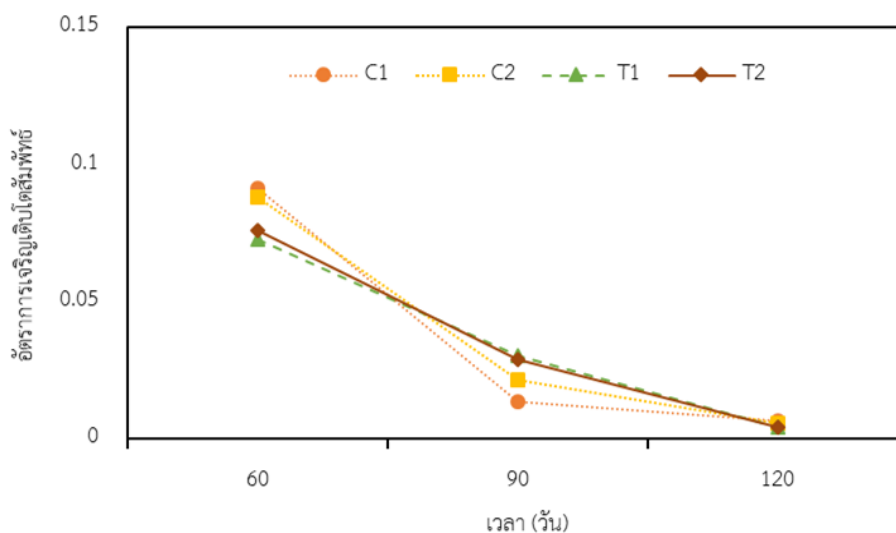


รูปที่ 4.13 ผลของสารอิตีทีเอต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงของเฮมพ์

#### 4.4.3 การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate; RGR)

ทำการเก็บตัวอย่างพืชที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน ของการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ค่าการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของเฮมพ์ จากการวิเคราะห์พบว่า เฮมพ์มีการเจริญเติบโตสัมพัทธ์สูงสุดในช่วงระยะเวลาที่ 60 วัน โดยมีค่าการเจริญเติบโตสัมพัทธ์เท่ากับ 0.091, 0.088, 0.073 และ 0.076 ตามลำดับชุดการทดลอง ( $C_1$ - $C_2$ - $T_1$ - $T_2$ ) (รูปที่ 4.14) และการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของเฮมพ์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น โดยวันที่สิ้นสุดการทดลอง (120 วัน) พบว่า เฮมพ์มีการเจริญเติบโตสัมพัทธ์เท่ากับ 0.007, 0.006, 0.004 และ 0.004 ตามลำดับชุดการทดลอง ทั้งนี้การเจริญเติบโตสัมพัทธ์ เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักพืชในช่วงเวลาหนึ่ง หรือสามารถกล่าวได้ว่า การเจริญเติบโตสัมพัทธ์มีค่าสูงที่สุดที่ 60 วันของการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพืชเริ่มเกิดการงอกของเมล็ด (Seed Germination) จะมีการเจริญเติบโตเป็นไปอย่างช้า ๆ และจะเริ่มมีการเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วในช่วงต้นกล้าของพืช (Juvenility) ซึ่งพืชจะมีการเจริญเติบโตทางด้านกิ่งและใบได้อย่างรวดเร็ว จึงเป็นช่วงที่เฮมพ์มีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์สูงสุด (60 วัน) และเมื่อพืชอายุมากขึ้นการเจริญเติบโตด้านความสูงหรือการแตกกิ่งใบจะเริ่มลดลง (Adult) ทั้งนี้ย่อมขึ้นอยู่กับชนิดของพืชด้วย (Jeff, 2018)





รูปที่ 4.14 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของเฮมพ์

#### 4.5 การวิเคราะห์ปริมาณสารเตตราไฮโดรแคนนาบินอล (Tetrahydrocannabinol, THC)

เนื่องจากเฮมพ์ถูกจัดให้เป็นยาเสพติดให้โทษชนิดที่ 5 และจากพระราชบัญญัติให้โทษ พ.ศ. 2522 ได้นิยามคำว่า “เฮมพ์ (Hemp)” หมายความว่า พืชซึ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cannabis sativa* L. subsp. *sativa* อันเป็นชนิดย่อยของพืชกัญชา (*Cannabis sativa* L.) ที่มีปริมาณสารเตตราไฮโดรแคนนาบินอล (Tetrahydrocannabinol, THC) ไม่เกินร้อยละ 1.0 ต่อน้ำหนักแห้ง (ปวีณา ชาตรีธรรมรงค์, 2561) ดังนั้น จากนิยามข้างต้นทำให้การศึกษาวิจัยในครั้งนี้จึงมีความจำเป็นต้องมีการตรวจวัดสารเสพติดเตตราไฮโดรแคนนาบินอล หรือ สารเสพติด THC ของเฮมพ์ เพื่อให้มั่นใจได้ว่า สารเสพติด THC จะไม่เกินร้อยละ 1 ต่อน้ำหนักแห้ง (ติดตามโดยพนักงานและเจ้าหน้าที่จากสำนักงานอาหารและยา) โดยผลการทดสอบปริมาณสารเสพติด THC สามารถรายงานผลได้ 2 วิธีการดังต่อไปนี้

##### 4.5.1 ชุดตรวจวัดปริมาณทีเอชซีภาคสนาม (THC test kit)

ทำการวิเคราะห์สารเสพติด THC ของเฮมพ์ที่มีอายุ 90 และ 120 วัน เนื่องจากเป็นช่วงที่เฮมพ์มีการเจริญเติบโตเต็มวัยและใกล้เข้าสู่ช่วงออกดอก เฮมพ์จึงมีการผลิตเส้นใยและสารประกอบต่าง ๆ สูง โดยทำการเก็บตัวอย่างส่วนใบและส่วนยอดของเฮมพ์ จากส่วนบนของลำต้น ซึ่งต้องเป็นตำแหน่ง 1 ใน 3 ส่วนของลำต้น หรือไม่เกิน 20 เซนติเมตร จากยอด จำนวน 1-3 ยอด ของทุกชุดการทดลอง นำมาวัดปริมาณสารเสพติด THC ด้วยชุดตรวจวัดทีเอชซีภาคสนาม (ภาคผนวก ง) ซึ่งเป็นชุดตรวจวัดเบื้องต้น ที่ใช้หลักการแยกสารด้วยวิธี Thin Layer Chromatography ผลการทดสอบพบว่า เมื่อเทียบขนาดและความเข้มสีของจุดบนแผ่นทดสอบกับแผ่นเทียบมาตรฐาน THC นั้น สาร

เสพติด THC ในเฮมพ์ศึกษาที่ระยะเวลา 90 และ 120 วัน มีค่าของสีไม่เกินจุด Cut Off ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปริมาณสารเสพติด THC ของเฮมพ์ที่ทำการศึกษา มีค่าไม่เกินร้อยละ 1.0 ต่อน้ำหนักแห้ง เนื่องจากจุด Cut Off บนแผ่นทดสอบมาตรฐาน THC มีจุด Cut Off อยู่ที่ 0.8 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักต่อน้ำหนัก

#### 4.5.2 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารเตตราไฮโดรแคนนาบินอล (Tetrahydrocannabinol, THC) ทางห้องปฏิบัติการของกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข

สำหรับการส่งตัวอย่างเฮมพ์เพื่อการวิเคราะห์หาสารเสพติด THC ได้ทำการพิจารณาเฮมพ์ที่มีอายุ 90 และ 120 วัน โดยทำการคัดเลือกส่วนใบและส่วนยอดของเฮมพ์ (ประมาณ 20 เซนติเมตร จากยอด จำนวน 1-3 ยอด) จากชุดการทดลองที่คาดว่าจะมีปริมาณสารเสพติด THC เกินกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด ได้แก่ ชุดควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_2$ ) และ ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) นำตัวอย่างส่งกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข เพื่อวิเคราะห์สารเสพติด THC ด้วยวิธี In House Method by LC/MS/MS ผลการทดสอบสารเสพติด THC ที่ระยะเวลา 90 วัน พบว่า เฮมพ์จากชุดควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_2$ ) มีปริมาณสารเสพติด THC เท่ากับ 0.0022 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งเป็นปริมาณที่ต่ำมาก และผลการทดสอบสารเสพติด THC ที่ระยะเวลา 120 วัน พบว่า เฮมพ์จากชุดควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_2$ ) มีปริมาณสารเสพติด THC เท่ากับ 0.0160 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง และสำหรับชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) มีปริมาณสารเสพติด THC เท่ากับ 0.0290 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง จึงสามารถสรุปได้ว่า สารเสพติด THC จากทั้งสองชุดการทดลองมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ ทั้งนี้ปริมาณสารเสพติด THC มีความสัมพันธ์กับอายุของเฮมพ์ เมื่ออายุของเฮมพ์เพิ่มขึ้น ปริมาณสารเสพติด THC จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผลการวิเคราะห์สารเสพติด THC ที่ระยะเวลา 120 วัน มีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์สารเสพติด THC ที่ 90 วัน เล็กน้อยเท่านั้นและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

#### 4.6 การวิเคราะห์และทดสอบความเป็นพิษของเฮมพ์

เฮมพ์เป็นพืชที่ให้เส้นใยอ่อนนุ่ม เหนียว และทนทาน จึงนิยมนำเฮมพ์มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในการเตรียมวัตถุดิบตั้งต้นจากเฮมพ์ก่อนนำไปแปรรูป จะเตรียมจากส่วนเปลือก (เส้นใย) และแกนของเฮมพ์ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะเป็นส่วนที่นำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อการใช้ประโยชน์ ซึ่งอาจมีการแพร่กระจายของฝุ่นละอองจากเฮมพ์ในบรรยากาศ และอาจแพร่กระจายเข้าสู่ร่างกาย

ของผู้รับสัมผัสได้ งานวิจัยในครั้งนี้ จึงได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในส่วนเปลือก (เส้นใย) และแกนของเฮมพ์ ที่ระยะเวลา 90-120 วัน ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตของเฮมพ์ จากการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ จะเห็นได้ว่า เฮมพ์ของทุกชุดการทดลองเริ่มมีการเจริญเติบโตเต็มที่ ตั้งแต่ระยะเวลาที่ 60-90 วัน โดยผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในส่วนเปลือก (เส้นใย) และแกนของเฮมพ์ แสดงดังตารางที่ 4.3 จากตารางแสดงให้เห็นได้ว่า ทุกชุดการทดลอง ( $C_1$ - $C_2$ - $T_1$ - $T_2$ ) แคดเมียมมีการเข้าไปสะสมยังบริเวณส่วนเปลือก (เส้นใย) มากกว่าแกน และเมื่อระยะเวลาของการทดลองที่มากขึ้น เฮมพ์ก็มีแนวโน้มของการสะสมแคดเมียมในส่วนเปลือก (เส้นใย) และแกนสูงขึ้นเช่นกัน และจากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นได้ว่า ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอิตีทีเอในอัตราส่วน 1:1 โมล ( $T_1$ ) เป็นชุดการทดลองที่มีแคดเมียมสะสมบริเวณส่วนเปลือก (เส้นใย) และแกนในปริมาณที่สูงที่สุด รองลงมาคือ  $C_2 > T_2 > C_1$  ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินและปริมาณการดูดซับและสะสมแคดเมียมในเฮมพ์ ที่แสดงให้เห็นว่า ชุดการทดลอง  $T_1$  เป็นชุดการทดลองที่สามารถลดปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินได้สูงสุด และเฮมพ์ยังมีการสะสมแคดเมียมภายในส่วนต่าง ๆ ของพืชได้มากที่สุดเช่นกัน

ตารางที่ 4.3 ปริมาณแคดเมียมในส่วนเปลือก (เส้นใย) และแกนของเฮมพ์ในการทำผลิตภัณฑ์

ชุดการทดลอง	แคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง)			
	ส่วนเปลือก (เส้นใย)		ส่วนแกน	
	90 วัน	120 วัน	90 วัน	120 วัน
$C_1$	0.16	0.18	0.08	0.11
$C_2$	0.78	0.99	0.42	0.47
$T_1$	0.58	1.24	0.52	0.58
$T_2$	0.56	1.57	0.40	0.45

หมายเหตุ:  $C_1$  = ชุดควบคุมที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม  $C_2$  = ชุดควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม  $T_1$  = ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอิตีทีเอในอัตราส่วน 1:1 และ  $T_2$  = ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอิตีทีเอในอัตราส่วน 1:2

สำหรับการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ พบว่า มีการวางเส้นใย ตัด บดเส้นใย ซึ่งทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กฟุ้งกระจายในบรรยากาศ แล้วติดตามร่างกายของผู้ผลิต ดังนั้นในระหว่างกระบวนการผลิต หากมีการสวมหน้ากากอนามัยที่สามารถกรองอนุภาคฝุ่นขนาดเล็ก จะสามารถช่วยป้องกันความเป็นพิษที่เกิดจากการสูดดมได้ ดังนั้น งานวิจัยในครั้งนี้ จึงได้ทำการประเมินความเป็นพิษ

จากการกินเป็นวิถีหลัก และทำการประเมิน 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) รูปแบบในแง่ที่แคดเมียมมีพิษก่อให้เกิดโรคอื่นที่ไม่ใช่โรคมะเร็ง (Noncarcinogen) และ 2) รูปแบบที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Carcinogen) ทำการวิเคราะห์ในรูปแบบที่เป็นกรณีร้ายแรง (Worse Case) และขนาดที่อาจได้รับขั้นต่ำเป็นกรณีพื้นฐาน โดยใช้น้ำหนักเฉลี่ยเพศชายและเพศหญิง อายุ 16 ปี ขึ้นไป มีน้ำหนักเฉลี่ย 68.66 และ 57.48 กิโลกรัม ตามลำดับ (ที่มา: <http://www.sizethailand.org/sizechart.html>) ซึ่งมีค่าแนวโน้มของการได้รับดินและฝุ่น (Soil and Dust) ผ่านการกิน 4-50 มิลลิกรัมต่อวัน (ขั้นต่ำสุด-ขั้นสูงสุด) มีค่าเฉลี่ย 30 มิลลิกรัมต่อวัน (USEPA., 2017)

จากการวิเคราะห์ความเสี่ยงในรูปแบบแคดเมียมมีพิษก่อให้เกิดโรคอื่นที่ไม่ใช่โรคมะเร็ง (Noncarcinogen) ซึ่งคิดจากผลรวมดัชนีย่อยความเป็นอันตรายของสารพิษ (Hazard Index; HI) (ดังภาคผนวก จ ตารางที่ จ1-จ2) พบว่า ค่า HI ของทุกชุดการทดลอง ทั้งระยะเวลาที่ 90 และ 120 วัน มีค่า HI น้อยกว่า 1 ซึ่งแสดงว่า ปริมาณสารที่ได้รับเข้าไปยังเป็นการเสี่ยงที่ยอมรับได้และถือว่ายังปลอดภัย และสำหรับการประเมินความเสี่ยงในรูปแบบที่แคดเมียมก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Carcinogen) (ดังภาคผนวก จ ตารางที่ จ3-จ4) โดยหาความเสี่ยงในรูปแบบค่าความเสี่ยงที่รับได้ (Acceptable Risk; R) พบว่า ทั้งส่วนเปลือก (เส้นใย) และแกนของเฮมพ์จากทุกชุดการทดลอง มีค่า R น้อยกว่า  $1 \times 10^{-6}$  ซึ่งถือได้ว่า ไม่มีความเสี่ยงในการเป็นโรคมะเร็ง (Dawotola et al., 2012) ดังนั้น จากการทดลองจึงสรุปได้ว่า กรณีที่ปลูกเฮมพ์บนดินปนเปื้อนแคดเมียมในธรรมชาติ ผลิตภัณฑ์ยังมีความเสี่ยงในการก่อให้เกิดโรคน้อยมาก และยิ่งถือได้ว่าอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภค

#### 4.7 สมดุลมวล (Mass Balance)

การทำสมดุลมวล เป็นการศึกษาปริมาณแคดเมียมที่มีอยู่ในระบบของการทดลอง โดยได้มีการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในดินทั้งหมด และปริมาณแคดเมียมที่สะสมอยู่ในพืช คือ เฮมพ์ โดยแยกความสามารถ และประสิทธิภาพในการดูดซับและสะสมแคดเมียมในเฮมพ์ออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ราก ลำต้น (แกน) ใบ และ เปลือก (เส้นใย) จากผลการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการคำนวณที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน ของการทดลอง (ภาคผนวก ค) โดยเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาของการทดลอง (120 วัน) ดังรูปที่ 4.4 พบว่า ทุกชุดการทดลองมีปริมาณแคดเมียมที่สูญหายไปจากระบบ ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากแคดเมียมบางส่วนมีการติดอยู่กับภาชนะทดลอง และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และบางส่วนติดอยู่กับเฮมพ์ในช่วงทำการเก็บตัวอย่าง ซึ่งจะต้องมีการนำเฮมพ์มาล้างดินให้สะอาดก่อนทำการวิเคราะห์ จึงอาจส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมบางส่วนอาจสูญหายไปจากระบบได้ และเมื่อพิจารณาจากการคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับและการสะสมแคดเมียมในเฮมพ์ พบว่า เฮมพ์มีความสามารถ

ในการดูดซับและสะสมแคดเมียมไว้ส่วนใต้ดิน (ราก) มากกว่าส่วนเหนือดิน (ลำต้น (แกน) ใบ และเปลือก (เส้นใย)) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างปริมาณแคดเมียมในพืชต่อปริมาณแคดเมียมในดินของทุกชุดการทดลอง พบว่า ชุดควบคุมที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_1$ ) มีอัตราส่วนระหว่างปริมาณแคดเมียมในพืชต่อปริมาณแคดเมียมในดินสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ( $C_2$ - $T_1$ - $T_2$ ) ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาณแคดเมียมในดินของชุดควบคุม  $C_1$  มีความเข้มข้นของแคดเมียมในดินต่ำมาก จึงทำให้เฮมพ์มีการเจริญเติบโตด้านมวลชีวภาพสูง (Citterio et al., 2003) ส่งผลให้เฮมพ์ในชุดควบคุม  $C_1$  สามารถดูดซับและสะสมแคดเมียมได้ดีกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ ในทางตรงกันข้าม เมื่อปริมาณแคดเมียมในดินเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เฮมพ์มีมวลชีวภาพลดลง แต่เนื่องจากเฮมพ์เป็นพืชที่ทนต่อความเครียดของแคดเมียมสูง จึงทำให้เฮมพ์สามารถดูดซับและสะสมแคดเมียมในดินได้สูงขึ้น แม้ว่ามวลชีวภาพจะลดลงก็ตาม (Linger et al., 2005; Tang et al., 2015)

#### 4.8 การวิเคราะห์การกระจายตัวของแคดเมียมในเฮมพ์ด้วยแสงซินโครตรอน

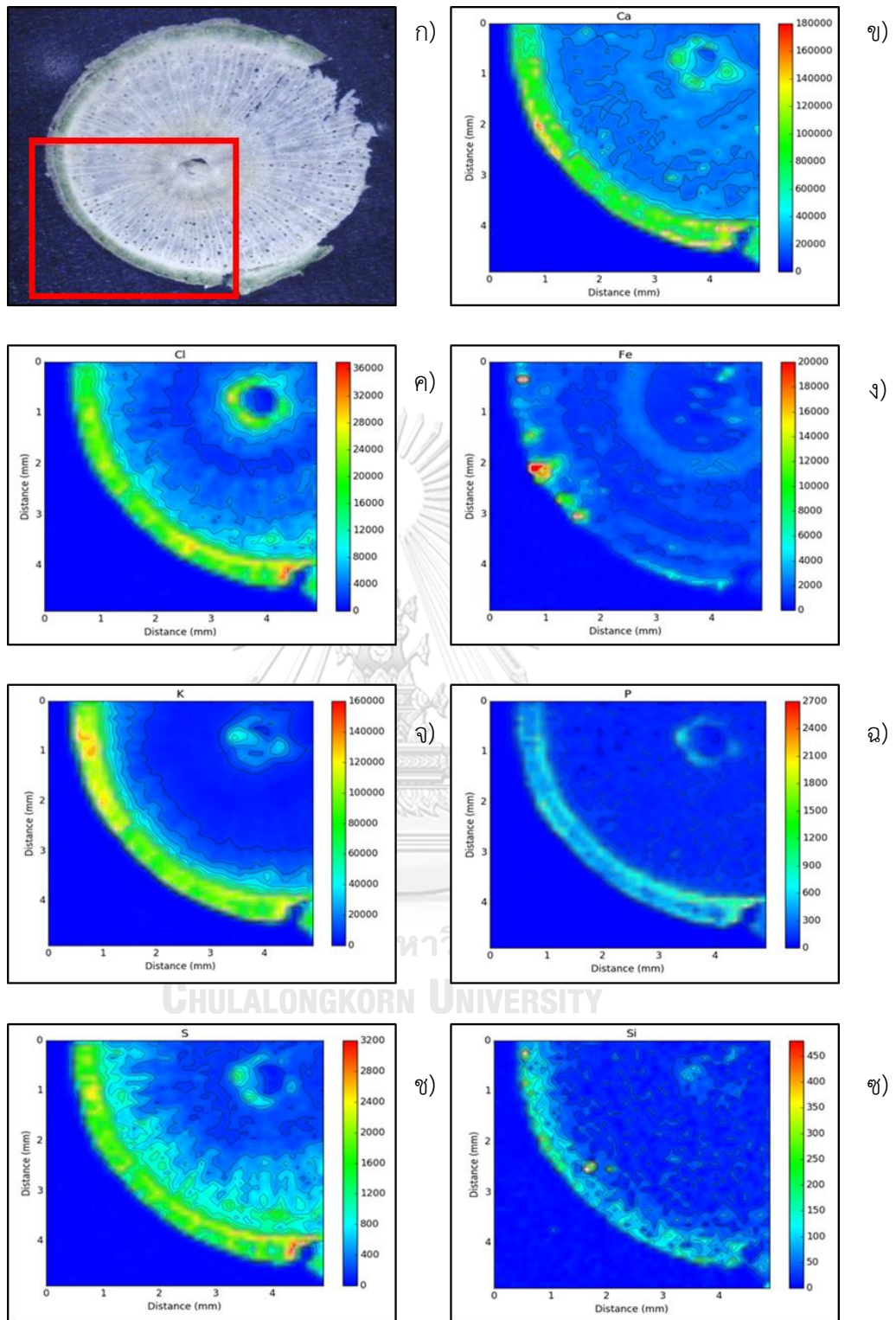
การวิเคราะห์การกระจายตัวของแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของเฮมพ์ ด้วยระบบแสงซินโครตรอน (Synchrotron) โดยใช้เทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (Synchrotron Radiation X-ray Fluorescence; SR-XRF) ของระบบลำแสงที่ 6 (BL6b) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การสะสมและการกระจายตัวของแคดเมียม ในส่วนแกนและเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สามารถนำไปใช้พัฒนาและสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ระยะเวลา 120 วัน ของการทดลอง ประกอบด้วยชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีดีทีเอ อัตราส่วน 1:1 โมล ( $T_1$ ) และ ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีดีทีเอ อัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ พบว่า ระบบลำแสงที่ 6 (BL6b) หรือเทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์นั้น ไม่สามารถตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนแกน และเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์ได้ เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของเฮมพ์มีปริมาณความเข้มข้นต่ำ (Limit of detection = 150-200 ppm) หากแต่พบการกระจายตัวของธาตุอื่น ๆ ได้แก่ แคลเซียม (Ca) คลอรีน (Cl) เหล็ก (Fe) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) และ ซิลิกอน (Si) (รูปที่ 4.15-4.16) ซึ่งธาตุที่กล่าวมาข้างต้นนั้นมีความเข้มข้นสูงกว่าแคดเมียม ซึ่งจากรูปดังกล่าว แสดงให้เห็นระดับความเข้มข้นต่ำหรือสูงของธาตุแต่ละชนิดด้วยแถบสี โดยสีน้ำเงินจะแสดงความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ในปริมาณที่วัดได้ต่ำที่สุด ไปจนถึงสีแดงที่แสดงความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ที่วัดได้ในปริมาณที่สูงที่สุด ผลการวิเคราะห์ครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ มนทิรา สุขเจริญ (2559) ที่ทำการศึกษากลยุทธ์การดูดซับแคดเมียมในน้ำเสีย ระบุอะซีติกเอซิด (EDTA) และกรดไนตริกโพรอะซีติกเอซิด (NTA) ต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสีย

สังเคราะห์ด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ และได้นำตัวอย่างของพืชศึกษาไปวิเคราะห์การสะสมและการกระจายตัวของแคดเมียม ด้วยระบบลำเลียงแสงที่ 6 (BL6b) หรือเทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ จากผลการวิเคราะห์ ไม่สามารถตรวจวัดการสะสมแคดเมียมได้ทั้งในส่วนใต้น้ำ (ราก) และส่วนเหนือน้ำ (ลำต้น และใบ) ได้เช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ และระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในตัวอย่างที่น้อยเกินไป หากแต่สามารถตรวจพบการเคลื่อนที่ และสะสมของธาตุอื่น ๆ ในส่วนต่าง ๆ ของหญ้าเนเปียร์แคระ ได้แก่ อาร์กอน (Ar) แคลเซียม (Ca) คลอรีน (Cl) และโพแทสเซียม (K) ซึ่งธาตุที่พบมีปริมาณความเข้มข้นที่สูงกว่าแคดเมียม นอกจากนี้ยังพบว่า แคลเซียมมีการสะสมมากที่สุดในส่วนของลำต้น รองลงมาคือ ส่วนใบ และส่วนราก ตามลำดับ



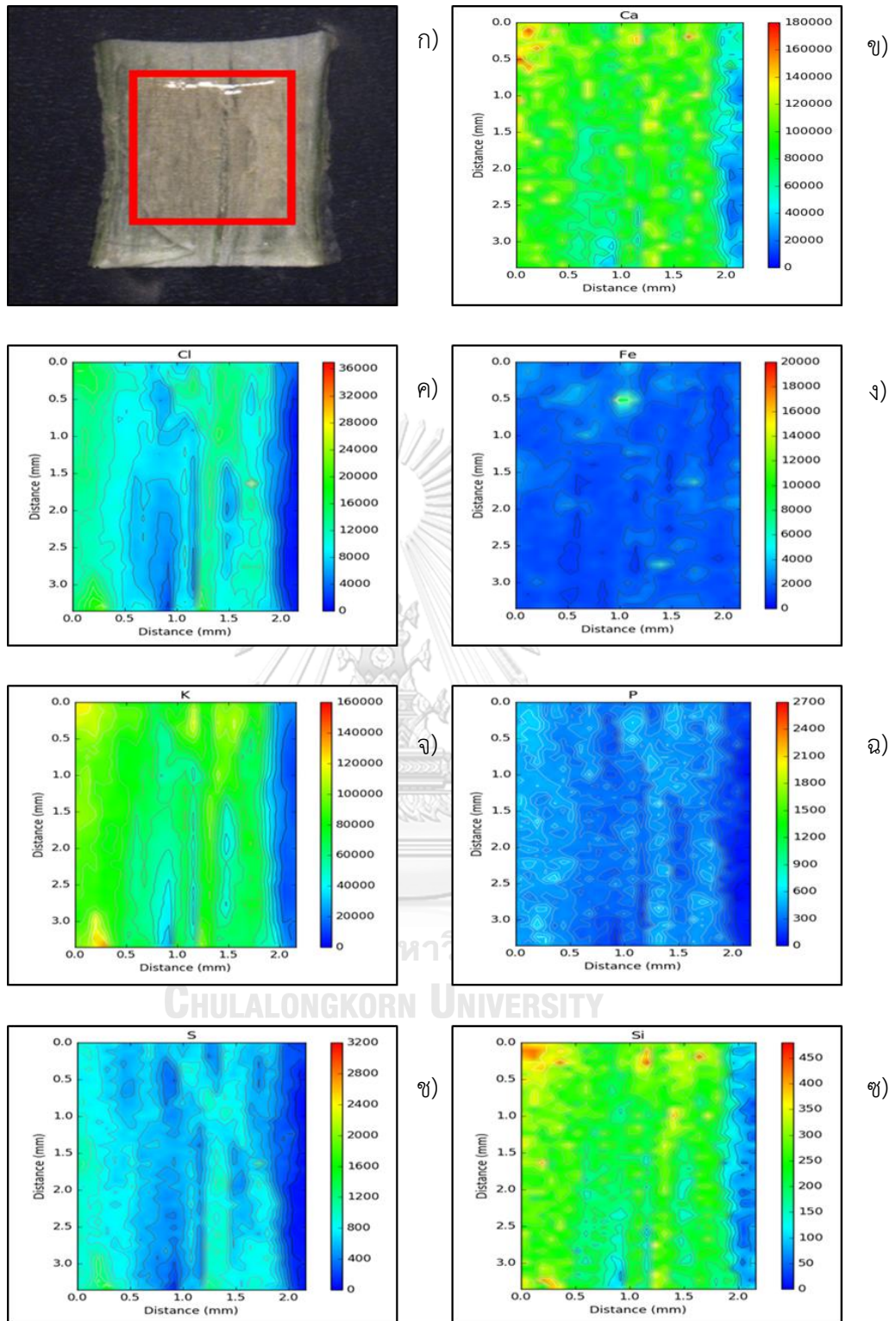
ตารางที่ 4.4 สมดุลมวล (Mass balance) ของการดูดซับและสะสมแคดเมียมด้วยเฮมพ์ที่ปลูกในดินปนเปื้อน ที่ระยะเวลา 120 วัน (สิ้นสุดการทดลอง)

ชุดการทดลอง	แคดเมียมเริ่มต้น	ปริมาณแคดเมียมในเฮมพ์ (มิลลิกรัม)				ปริมาณแคดเมียมในเฮมพ์ (%)				แคดเมียมคงเหลือในดิน (%)	รวมปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในระบบ (%)		
		ราก	ลำต้น (แกน)	ใบ	เปลือก (เส้นใย)	รวมทั้งหมด	ราก	ลำต้น (แกน)	ใบ			เปลือก (เส้นใย)	
C <sub>1</sub>	5.56	0.0113	0.0058	0.0051	0.0040	0.0262	0.2031	0.1042	0.0916	0.0719	0.4710	84.32	84.79
C <sub>2</sub>	373.64	0.1904	0.0179	0.0098	0.0059	0.2238	0.0509	0.0047	0.0026	0.0015	0.0599	81.87	81.93
T <sub>1</sub>	373.64	0.1741	0.0143	0.0166	0.0061	0.2111	0.0466	0.0038	0.0044	0.0016	0.0565	79.48	79.90
T <sub>2</sub>	373.64	0.1271	0.0098	0.0073	0.0040	0.1481	0.0339	0.0026	0.0019	0.0010	0.0396	87.75	87.79



รูปที่ 4.15 การเคลื่อนที่และการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ในส่วนลำต้น (แกน) เหมพี ด้วยระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน เทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (SR-XRF) ก) ภาพตัดขวางส่วนลำต้น (แกน) ข) แคลเซียม (Ca) ค) คลอไรด์ (Cl) ง) เหล็ก (Fe) จ) โพแทสเซียม (K) ฉ) ฟอสฟอรัส (P) ช) ซัลเฟอร์ (Sulfur) และ ซ) ซิลิคอน (Si) ในเหมพี





รูปที่ 4.16 การเคลื่อนที่และการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ในส่วนเปลือก (เส้นใย) เหมป ด้วยระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน เทคนิคไมโครเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (SR-XRF) ก) ภาพตัดขวางส่วนเปลือก (เส้นใย) ข) แคลเซียม (Ca) ค) คลอไรด์ (Cl) ง) เหล็ก (Fe) จ) โพแทสเซียม (K) ฉ) ฟอสฟอรัส (P) ช) ซัลเฟอร์ (Sulfur) และ ซ) ซิลิคอน (Si) ในเหมป

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลของสารอีทีทีเอต่อการดูดตั้งแคดเมียมในดินปนเปื้อนด้วยเฮมพ์ ได้ทำการศึกษาในโรงเรือนทดลองชั้นที่ 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ 1) ชุดควบคุมที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_1$ ) 2) ชุดควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_2$ ) 3) ชุดการทดลองดินปนเปื้อนแคดเมียม ร่วมกับการเติมสารอีทีทีเอ ในอัตราส่วน 1:1 โมล ( $T_1$ ) และ 4) ชุดการทดลองดินปนเปื้อนแคดเมียม ร่วมกับการเติมสารอีทีทีเอ ในอัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 120 วัน และมีการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน ซึ่งผลการศึกษสามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังต่อไปนี้

##### 5.1.1 ผลของสารอีทีทีเอต่อความสามารถในการดูดตั้งแคดเมียมในดินด้วยเฮมพ์

ผลของสารอีทีทีเอต่อความสามารถในการดูดตั้งแคดเมียมในดินด้วยเฮมพ์ พบว่า ที่ระยะเวลาทำการทดลอง 30, 60, 90 และ 120 วัน ชุดการทดลองดินปนเปื้อนแคดเมียมร่วมกับการเติมสารอีทีทีเอในอัตราส่วน 1:1 โมล ( $T_1$ ) มีประสิทธิภาพในการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียมได้สูงที่สุด รองมาคือ  $C_2 > T_2 > C_1$  ตามลำดับ ซึ่งที่ระยะเวลา 120 วัน ของการทดลอง แสดงให้เห็นว่า ทุกชุดการทดลอง ดินมีปริมาณการสะสมแคดเมียมต่ำที่สุด โดยชุดควบคุมที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_1$ ) มีปริมาณแคดเมียม เท่ากับ 0.47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ชุดควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม ( $C_2$ ) มีปริมาณแคดเมียม เท่ากับ 30.59 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ชุดการทดลองดินปนเปื้อนแคดเมียมร่วมกับการเติมสารอีทีทีเอในอัตราส่วน 1:1 โมล ( $T_1$ ) มีปริมาณแคดเมียม เท่ากับ 30.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และชุดการทดลองดินปนเปื้อนแคดเมียมร่วมกับการเติมสารอีทีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล ( $T_2$ ) มีปริมาณแคดเมียม เท่ากับ 32.79 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินที่ลดลง มีความสอดคล้องกับการศึกษาผลของสารอีทีทีเอต่อปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของเฮมพ์ โดยพบว่า ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง ชุดการทดลอง  $T_1$  เป็นชุดการทดลองที่เฮมพ์มีการสะสมแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ราก ลำต้น เปลือก (เส้นใย) และ ใบ สูงที่สุด และจากการศึกษา ยังพบว่า ทุกชุดการทดลอง เฮมพ์มีการสะสมแคดเมียมในรากสูงที่สุด รองลงมาคือ เปลือก (เส้นใย) > ลำต้น > ใบ ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่า สารอีทีทีเอนั้นมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความสามารถในการดูดตั้งแคดเมียมจากส่วนใต้ดินขึ้นไปสะสมยังส่วนเหนือดินของเฮมพ์ได้สูงขึ้น โดยพบว่า ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง ชุดการทดลองที่เติมสารอีทีทีเอ ( $T_1$ - $T_2$ ) เฮมพ์มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในใบสูงกว่าชุดควบคุม ( $C_1$ - $C_2$ ) ซึ่งที่ระยะเวลา 120 วัน เฮมพ์ของแต่ละชุดการทดลองมีปริมาณแคดเมียม

สะสมในใบ เท่ากับ 0.53, 1.06, 1.86 และ 1.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับของชุดการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่า สารอินทรีย์เอมีผลต่อการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งและความสูงของเฮมพ์ โดยจากการทดลองพบว่า เฮมพ์ที่เติบโตในชุดควบคุม C<sub>1</sub> มีการเจริญเติบโตดีกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ และชุดการทดลองที่เฮมพ์มีการเจริญเติบโตทั้งในด้านน้ำหนักแห้งและความสูงต่ำที่สุดคือ ชุดการทดลอง T<sub>2</sub> ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมสารอินทรีย์เอที่มีความเข้มข้นสูงเกินไป อาจส่งผลให้พืชเกิดความเป็นพิษและชะงักการเจริญเติบโต จึงทำให้เฮมพ์มีการเติบโตได้ไม่ดีเท่าที่ควร

### 5.1.2 การศึกษาการกระจายตัวของแคดเมียมในเฮมพ์ด้วยเทคนิคแสงซินโครตรอน

การศึกษารายการกระจายตัว และการสะสมแคดเมียมในส่วนแกน และเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์ ที่ระยะเวลา 120 วัน ของการทดลอง ด้วยเทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (SR-XRF) พบว่า เทคนิคดังกล่าวมีขีดจำกัดในการศึกษารายการกระจายตัว และการสะสมแคดเมียม เนื่องจากแคดเมียมในตัวอย่างเฮมพ์มีระดับความเข้มข้นต่ำกว่าที่เครื่องจะสามารถวิเคราะห์ผลได้ จึงทำให้ไม่ประสบความสำเร็จในการศึกษาด้วยเทคนิคหรือวิธีดังกล่าว หากแต่สามารถวิเคราะห์ธาตุอื่น ๆ ได้ ได้แก่ แคลเซียม (Ca) คลอรีน (Cl) เหล็ก (Fe) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) และซิลิกอน (Si) ซึ่งธาตุดังกล่าวนี้มีความเข้มข้นสูงกว่าแคดเมียม จึงสามารถทำการวัดการกระจายตัว และการสะสมในส่วนแกน และเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์ ด้วยเทคนิคไมโครเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ได้

### 5.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารเตตราไฮโดรแคนนาบินอลในใบเฮมพ์

จากผลการทดสอบปริมาณสารเสพติด THC ด้วยชุดตรวจวัดปริมาณที่เอชซีภาคสนาม (THC Test Kit) และจากการส่งตัวอย่างเพื่อตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์ In House Method by LC/MS/MS โดยกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข ผลการวิเคราะห์ พบว่า ปริมาณสาร THC ในเฮมพ์ทั้งเดือนที่ 3 และ 4 มีค่าต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ตามที่กฎหมายกำหนดไว้

### 5.1.4 การประเมินความเป็นพิษและความเสี่ยงจากผลิตภัณฑ์

จากการประเมินความเป็นพิษและความเสี่ยงจากเปลือก (เส้นใย) และแกนของเฮมพ์ ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ประโยชน์ สามารถกล่าวได้ว่า ตัวอย่างส่วนเปลือก (เส้นใย) และแกน ของเฮมพ์ ที่ระยะเวลา 90 และ 120 วัน ของการทดลอง ผลจากการประเมินความเป็นพิษและความเสี่ยงจากผลิตภัณฑ์ พบว่า ปริมาณแคดเมียมคงเหลืออยู่ในพืชทุกชุดการทดลอง (C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>-T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>) และอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อผู้ผลิตและผู้บริโภค

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการส่งเสริมและสนับสนุนให้ชุมชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมสามารถปลูกเหมาพืในพื้นที่ปนเปื้อนจริงได้ เพื่อที่จะสามารถนำเหมาพืมาสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ส่งเสริมรายได้ให้กับชุมชน ควบคู่ไปกับการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียม ซึ่งจะส่งผลให้ประชาชนในท้องถิ่นนั้นมีรายได้เพิ่มขึ้น และมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น

5.2.2 การเติมสารอิตีทีเอลงในดินเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้แคดเมียมคงอยู่ในรูปของสารละลายได้นาน อันเป็นการง่ายต่อการถูกดูดดึงด้วยเหมาพื และยังง่ายต่อการถูกชะลงสู่น้ำใต้ดิน ดังนั้น หากมีการนำสารอิตีทีเอไปใช้ในพื้นทีจริง จึงควรมีการศึกษาผลของสารอิตีทีเอต่อน้ำใต้ดิน เนื่องจาก หากพื้นที่บำบัดมีระดับน้ำใต้ดินสูง อาจส่งผลกระทบต่อกรปนเปื้อนแคดเมียมในน้ำใต้ดินได้

5.2.3 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป ควรมีการเพิ่มชุดการทดลองที่ใช้สารคีเลตผสม หรือทำการทดลองที่ใช้ปุ๋ยร่วมกับการเติมสารคีเลต เพื่อดูแนวโน้มในการบำบัดพื้นทีปนเปื้อนที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพในการเพิ่มการดูดดึงและสะสมโลหะหนักในพืช



## บรรณานุกรม

- Abdel-Salam, M. A. (2012). Chemical and phyto-remediation of clayey and sandy textured soils polluted with cadmium. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 12(6).
- Adriano, D. C. (2001). *Trace elements in terrestrial environments*. New York: Springer.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2012). *Toxicological Profile for Cadmium*. USA: Department of Health and Human Services.
- Ahmad, R., Tehsin, Z., Malik, S. T., Asad, S. A., Shahzad, M., Bilal, M., Shah, M. M., & Khan, S. A. (2016). Phytoremediation Potential of Hemp (*Cannabis sativa*L.): Identification and Characterization of Heavy Metals Responsive Genes. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 44(2), 195-201.
- Ali, M., S., R., Muhammad, S., & Tanzilla, Y. (2018). Hemp is the Future of Plastics. *E3S Web of Conferences*, 51.
- Aoshima, K. (2016). Itai-itai disease: Renal tubular osteomalacia induced by environmental exposure to cadmium—historical review and perspectives. *Soil Science and Plant Nutrition*, 319-326.
- Aselgzar, H., & Gatea, I. M. (2015). Extraction of heavy metals from contaminated soils using EDTA and HCl. *Journal of Engineering Research and Applications*, 21.
- Benavides, A. M., Duque, A. F., Duivenvoorden, J., Vasco, A., & Callejas, R. (2005). A first quantitative census of vascular epiphytes in rain forests of Colombian Amazonia. *Biodiversity and Conservation*, 14, 739–758.
- Blaylock, M., Salt, D., Dushenkov, S., Zakharova, O., Gussman, C., Kapulnik, Y., Ensley, B., & Raskin, I. (1997). Enhanced Accumulation of Pb in Indian Mustard by Soil-Applied Chelating Agents. *Environmental Science & Technology*, 31, 860-865.
- Borsari, M. (2014). Cadmium: Inorganic chemistry. In N. N. Gupta & D. A. Atwood (Eds.), *Encyclopedia of inorganic and bioinorganic chemistry*: John Wiley & Sons, Ltd.
- Burgot, J. L. (2012). *Complexometry III: Metal cation indicators and types of EDTA titrations*. New York: Springer New York.
- Chen, Y., Li, X., & Shen, Z. (2004). Leaching and uptake of heavy metals by ten different

- species of plants during an EDTA-assisted phytoextraction process. *Chemosphere*, 57(3), 187-196. doi:10.1016/j.chemosphere.2004.05.044
- Citterio, S., Santagostino, A., & Fumagalli, P. (2003). Heavy metal tolerance and accumulation of Cd, Cr and Ni by *Cannabis sativa* L. *Plant and Soil*, 256, 243–252.
- Codex. (2006). Joint FAO/WHO Food Standards Programme (CODEX STAN 193-1995). Retrieved 2019, May 17, from <http://www.codexalimentarius>
- Crisponi, G., & Nurchi, V. M. (2016). Chelating agents as therapeutic compounds basic principles. In J. Aaseth, G. Crisponi, & O. Andersen (Eds.), *Chelation therapy in the treatment of metal intoxication* (pp. 35-61). Boston: Academic press.
- Dawotola, A., Gelder, P. H. A. J. M., & Vrijling, J. K. (2012). Design for acceptable risk in transportation pipelines. *Risk Assessment and Management*, 16, 112-127.
- Ebrahimi, M. (2016). Enhanced Phyto remediation Capacity of *Chenopodium album* L. Grown on Pb-Contaminated Soils Using EDTA and Reduction of Leaching Risk. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 25(6), 652-667.
- Evangelou, M. W., Bauer, U., Ebel, M., & Schaeffer, A. (2007a). 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.
- Evangelou, M. W., Ebel, M., & Schaeffer, A. (2007b). Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents. *Chemosphere*, 68(6), 989-1003.
- Farid, M., Ali, S., Shakoor, M., Bharwana, S., Rizvi, H., Ehsan, S., Tauqeer, H., Iftikhar, U., & Hannan, F. (2013). EDTA Assisted Phyto remediation of Cadmium, Lead and Zinc. *Agronomy and Plant Production*, 4(11), 2833-2846.
- Gavrilescu, M. (2004). Removal of heavy metals from the environment by biosorption. *Engineering in Life Sciences*, 4, 219–232.
- Gitipour, S., Firouzbakht, S., Mirzaee, E., & Khalili, I. (2014). The efficiency of cleaning agents at different temperatures in soil washing process for arsenic contamination. *Journal of Science and Technology*, 47, 13-16.
- Global Organic Textile Standard (GOTS). (2017). GOTS Version 5.0. from <https://www.global-standard.org/>.

- Good, C., Davidson, J., Welsh, C., Snekvik, K., & Summerfelt, S. (2011). The effects of ozonation on performance, health and welfare of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in low-exchange water recirculation aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 44(3), 97-102.
- Goswami, S., & Das, S. (2015). A Study on Cadmium Phytoremediation Potential of Indian Mustard, *Brassica juncea*. *International Journal of Phytoremediation*, 17, 583–588.
- Grcman, H., Vodnik, D., Velikonja-Bolta, S., & Lestan, D. (2003). Ethylenediaminedissuccinate as a new chelate for environmentally safe enhanced lead phytoextraction. *Journal of Environmental Quality*, 32(2), 500-506.
- Guo, J., Feng, R., Ding, Y., & Wang, R. (2014). Applying carbon dioxide, plant growth-promoting rhizobacterium and EDTA can enhance the phytoremediation efficiency of ryegrass in a soil polluted with zinc, arsenic, cadmium and lead. *Journal of environmental management*, 141, 1-8.
- Gzar, H., & Gatea, I. (2015). Extraction of heavy metals from contaminated soils using EDTA and HCl. *Journal of Engineering Research and Applications*, 21, 45-61.
- Habiba, U., Ali, S., M., F., M., S., Rizwan, M., M., I., Abbasi, G., Hayat, T., & Ali, B. (2014). EDTA enhanced plant growth, antioxidant defense system, and phytoextraction of copper by *Brassica napus* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 1534–1544.
- Hadi, F., Hussain, F., & Hussain, M. (2014). Phytoextraction of Pb and Cd; the effect of Urea and EDTA on *Cannabis sativa* growth under metals stress. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 5, 30-39.
- Hodgson, J. D. (1963). Automation-A study in promise, problems, and polemics. *Human Resource Management*, 2(3), 1-9.
- Hooser, S. B. (2007). Chapter 27 cadmium. In G. a. R.C. (Ed.), *Veterinary toxicology* (pp. 422-426). Oxford: Academic press.
- Hunt, R., Causton, D. R., Shipley, B., & Askew, A. P. (2002). A Modern Tool for Classical Plant Growth Analysis. *Annals of Botany*, 90, 485-488.
- Ivanov, K., Zapryanova, P., Krustev, S., & Angelova, V. (2017). Application of scanning

- electron microscopy and x-ray evaluation of the main digestion methods for determination of macro elements in plant tissue. *Agricultural and Biosystems Engineering*, 11(6).
- Jeff, D. (2018). The Anatomy of a Cannabis Plant, and its Lifecycle. from <https://www.visualcapitalist.com/anatomy-cannabis-plant>
- Jerome, H., & Ernast, S. (2016). Industrial Hemp in North America: Production, Politics and Potential. *Agronomy*, 6(58).
- Jones, B. (1999). *Soil analysis handbook of reference methods*. New York: CRC Press.
- Juel, A., Dey, K., Akash, I., & Das, K. (2018). *Heavy metals phytoremediation potential of Napier Grass (Pennisetum Purpureum) Cultivated in Tannery Sludge. Bangladesh.*
- Karthika, N., Jananee, K., & Murugaiyan, V. (2016). Remediation of contaminated soil using soil washing-a review. *Journal of Engineering Research and Applications*, 6, 13-18.
- Kazmira. (2019). Phytoremediation: How Hemp Stores and Absorbs Pollutants. from <https://www.kazmira-llc.com/blog/soil-remediation-with-industrial-hemp/>
- Kersten, G., Majestic, B., & Quigley, M. (2016). Phytoremediation of cadmium and lead. *polluted watersheds*, 137.
- Lee, J., & Sung, K. (2014). Effects of chelates on soil microbial properties, plant growth and heavy metal accumulation in plants. *Ecological Engineering*, 73, 386-394. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.053>
- Linger, P., Mussig, J., Fischer, H., & Kobert, J. (2002). Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) growing on heavy metal contaminated soil: fibre quality and phytoremediation potential. *Industrial Crops and Products*, 16, 33-42.
- Linger, P., Ostwald, A., & Haensler, J. (2005). *Cannabis sativa* L. growing on heavy metal contaminated soil: growth, cadmium uptake and photosynthesis. *BIOLOGIA PLANTARUM*, 49(4), 567-576.
- Liphadzi, M., & 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.
- Liu, F., Tang, Y., Du, R., Yang, H., & Wu, Q. (2010). Root foraging for zinc and cadmium



- requirement in the Zn/Cd hyperaccumulator plant *Sedum alfredii*. *Plant and Soil*, 327(1), 365-375.
- Mcguigan, M. A. (2012). Chronic poisoning: trace metals and others. *Goldman's Cecil Medicine*, 1, 88-95. doi:org/10.1016/B978-1-4377-1604-7.00021-X
- Mendes, L. F., Zambotti-Villela, L., Simas-Rodrigues, C., & Colepicolo, P. (2015). Toxicological effects of metal-EDTA/NTA complex formation in a synthetic medium on the macroalga *Gracilaria domingensis*. *Journal of Applied Phycology*, 27(3), 1307-1314.
- Muhammad, D., Chen, F., Zhao, J., Zhang, G., & Wu, F. (2009). Comparison of EDTA and citric acid-enhanced phytoextraction of heavy metals in artificially metal contaminated soil by *Typha angustifolia*. *International Journal of Phytoremediation*, 11(6), 558-574.
- Nakbanpote, W., Sukadeetad, K., Paitlertumpai, N., Meesungeon, O., & Noisa-ngan, W. (2010). *Advances in Phytoremediation Research: A case study of Gynura pseudochino (L.)*. DC: INTECH Open Access Publisher.
- Nanthavong, K. (2012). *Effect of Nitrilotriacetic Acid (NTA) and Ethylelediaminetetraacetic Acid (EDTA) on Arsenic Uptake from Contaminated Soil by Mimosa Pudica L.* Chulalongkorn University, Bangkok.
- Neale, C. N., Bricka, R. M., & Chao, A. C. (1997). Evaluating acids and chelating agents for removing heavy metals from contaminated soils. *Environmental Progress*, 16(4), 274-280.
- Oviedo, C., & Rodríguez, J. (2003). EDTA: the chelating agent under environmental scrutiny. *Química Nova*, 26, 901-905.
- Pendias, K. A. a. P., H. (2000). *Trace elements in soil and plants*. Florida: CRC Press.
- Rahn, B. (2018). Indica vs. sativa: What's the difference between cannabis types? , from <https://www.leafly.com/news/cannabis-101/sativa-indica-and-hybrid-differences-between-cannabis-types>
- Raskin, I., & Ensley, D. (2000). *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment*. New York: John Wiley & Sons.
- Razuvaev, G. A., Domrachev, G. A., Suvorova, O. N., & Abakumova, L. G. (1971). Synthesis and stability of mixed sandwich chelate transition metal complexes. *Journal of*

*Organometallic Chemistry*, 32(1), 113-120.

- Reed, B. E., Carriere, P. C., & Moore, R. (1996). Flushing of a Pb (II) contaminated soil using HCl, EDTA, and CaCl<sub>2</sub>. *Journal of Environmental Engineering*, 122, 48-50.
- Ross, S. M. (1994). *Toxic Metals in Soil-Plant Systems*. England, UK: John Wiley and Sons., Ltd.
- Salimi, M., Amin, M., Ebrahimi, A., Ghazifard, A., & Najafi, P. (2012). Influence of electrical conductivity on the phytoremediation of contaminated soils to Cd<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup>. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 1(1), 57- 62.
- Sampanpanish, P., & Pinpa, K. (2018). Cadmium Removal from Contaminated Sediment Using EDTA and DTPA with Water Hyacinth. *International Journal of Environmental Research*, 12, 543–551.
- Santos, F. S., Hernandez-Allica, J., Becerril, J. M., Amaral-Sobrinho, N., Mazur, N., & Garbisu, C. (2006). Chelate-induced phytoextraction of metal polluted soils with *Brachiaria decumbens*. *Chemosphere*, 65(1), 43-50.
- Satarug, S., Baker, J. R., Urbenjapol, S., Haswell-Elkins, M., Reilly, P. E. B., Williams, D. J., & Moore, M. R. (2003). A global presepective on cadmium pollution and toxicity in nonoccupationally exposed population. *Toxicol*, 137, 65–83.
- Schnoor, J. L. (1997). Phytoremediation. *Technology Evaluation Report, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center*.
- Sharma, H., Rawal, N., & Mathew, B. (2015). The Characterisrics, Toxicity And Effects of Cadmium. *International Journal of Nanotechnology and Nanoscience*, 3, 1-9.
- Shi, G., & Cai, Q. (2009). Cadmium tolerance and accumulation in eight potential energy crops. *Biotechnology Advances*, 27, 555-561.
- Shi, G., Cai, Q., Liu, Q., & Wu, L. (2009). Salicylic acid-mediated alleviation of cadmium toxicity in hemp plants in relation to cadmium uptake, photosynthesis, and antioxidant enzymes. *Acta Physiol Plant*, 31, 969–977.
- Speight, J. G. (2017). Removal of inorganic compounds from the environment. *Environmental inorganic chemistry for engineers*, 427-478.
- Stieger, P. A., & Feller, U. R. S. (1994). Nutrient accumulation and translocation in maturing wheat plants grown on waterlogged soil. *Plant and Soil*, 160(1), 87-95.
- Stonehouse, G. C., McCarron, B. J., Guignardi, Z. S., El Mehdawi, A. F., Lima, L. W., Fakra,

- S. C., & Pilon-Smits, E. A. H. (2020). Selenium Metabolism in Hemp (*Cannabis sativa* L.)-Potential for Phytoremediation and Biofortification. *Environ Sci Technol*, *54*(7), 4221-4230.
- Sun, Y., Zhou, Q., Xu, Y., Wang, L., & Liang, X. (2011). The role of EDTA on cadmium phytoextraction in a cadmium-hyperaccumulator *Rorippa globose*. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, *3*, 45-51.
- Tananonchai, A., & Sampanpanish, P. (2014). Effect of EDTA and DTPA on cadmium removal from contaminated soil with water hyacinth. *Applied Environmental Research*, *36*(3).
- Tandy, S., Schulin, R., & Nowack, B. (2006). The influence of EDDS on the uptake of heavy metals in hydroponically grown sunflowers. *Chemosphere*, *62*, 1454-1463.
- Tang, Y., Bao, Q., & Tian, G. (2015). Heavy Metal Cadmium Tolerance on the Growth Characteristics of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) in China. *Environment and Chemical Engineering*, 289-295.
- Theisen, R. (1965). *General features of electron microprobe analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Turan, M., & Esringü, 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*, 7-15.
- Ukiwe, L., & Aneke, N. (2010). Hyperaccumulation: An Aspect of EDTA Chelate-Assisted Phytoextraction by Water Hyacinth. *The African Journal of Plant Science and Biotechnology*, *4*(1), 107-110.
- USEPA. (2000). Introduction to phytoremediation. In *National Risk Management Research Laboratory*. United States of America: Office of Research and Development.
- USEPA. (1996). *Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices (method 3052)*. Washington D.C., United States of America: USEPA.
- USEPA. (2007). *Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils (Method 3051A)*. Washington D.C., United States of America.
- USEPA. (2017). *Update for Chapter 5 of the Exposure Factors Handbook Soil and Dust*

- Ingestion*. Washington D.C., United States of America.
- Van der Perk, M. (2006). *Soil and water Contamination : from molecular to catchment scale*. London, U.K.: Taylor and Francis, Group plc.
- Vangronsveld, J., & Cunningham, S. D. (1998). *Metal-contaminated soils: In situ inactivation and phytoremediation*: Springer.
- Vulava, V. M., & Seaman, J. C. (2000). Mobilization of lead from highly weathered porous material by extracting agents. *Environmental Science and Technology*, 34, 4828-4834.
- Weihong, X., L., W., Jianping, H., Singh, B., & Zhiting, X. (2009). Effects of insoluble Zn, Cd, and EDTA on the growth, activities of antioxidant enzymes and uptake of Zn and Cd in *Vetiveria zizanioides*. *Journal of Environmental Sciences*, 21, 186–192.
- Wieliczko, M. (2019). Heavy metal testing to improve cannabis safety & quality. from <https://www.analyticalcannabis.com/articles/heavy-metal-testing-to-improve-cannabis-safety-quality-311445>
- World Health Organization (WHO). (1992). Cadmium. In *Environmental Health Criteria 134*. Geneva: WHO.
- World Health Organization (WHO). (2011). Evaluation of Certain Food Additives and Contaminants. from [http://whqlibdoc.who.int/trs/who\\_trs\\_960\\_eng.pdf](http://whqlibdoc.who.int/trs/who_trs_960_eng.pdf).
- Yanai, J., Zhao, F., McGrath, S., & Kosaki, T. (2005). Effect of soil characteristics on Cd uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Environmental Pollution*, 139, 167-175.
- Zhou, J., Deng, C., Si, S., Shi, Y., & Zhao, X. (2011). Study on the effect of EDTA on the photocatalytic reduction of mercury onto nanocrystalline titania using quartz crystal microbalance and differential pulse voltammetry. *Electrochimica Acta*, 56, 2062-2067.
- กรมพัฒนาที่ดิน. (2553). คู่มือปฏิบัติงานกระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี. from <https://www.ddd.go.th/PMQA/2553/Manual/OSD-03.pdf>
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. (2549). รายงานการศึกษาวินิจฉัยสาเหตุการปนเปื้อนแคดเมียมในดินพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. กรุงเทพมหานคร: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.
- กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์. (2562). “เฮมพ์” พืชไม่ธรรมดา มีคุณค่ามาจากสารสกัด และเส้นใย. วารสาร

สิ่งแวดล้อม, 23(3).

กิตติศักดิ์ กราบเกษะ, ดำรงค์ศักดิ์ วงศ์ฐาน และ กรวัฒน์ วุฒิกิจ. (2558). การใช้ประโยชน์จากเส้นใยกัญชงในการผลิตฉนวนกันความร้อน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์.

จารุวรรณ วงศ์เนศ. (2549). การใช้พืชบำบัดสารตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท). มหาวิทยาลัยมหิดล, นครปฐม.

ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ และ พุทธิพัทธ์ ราชคำ. (2561). เสมพ์กรีต (*Hempcrete*). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี,

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25. (2547). เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน: ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.

ประชุม คำพุ่ม. (2562). นวัตกรรมจาก 'กัญชง' เหลือใช้ ผลิตบล็อกก่อสร้างน้ำหนักเบา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี,

ปาริชาติ พจนศิลป์. (2562). “เสมพ์ หรือกัญชง” พืชเส้นใยคุณภาพ ต่อยอดสู่พืชเศรษฐกิจ. from <http://www.doa.go.th/hort/wpcontent/uploads/2019/01pdf>

พนัส พงศ์ผลาดิษฐ์. (2553). ผลของการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ต่อการดูดซับแคดเมียมและสังกะสีของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อน จากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

พันธวิศ สัมพันธ์พานิช. (2558). การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืช (Vol. 1). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พันธวิศ สัมพันธ์พานิช, และนิตยา รื่นสุข. (2556). ผลของพันธุ์ข้าวและชนิดของปุ๋ยต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 18(1), 105-115.

พิ ชิต พ ล แ ก้ ว ง ม . (2562). “เสมพ์ ” จาก พืช ต้อง ห้าม สู่ พืช เศรษฐกิจ . from <http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/article/hemp.pdf>

ไพลิน ภูวนัย, ประภัสสร ทิพย์รัตน์ และ พิภพ ชำนิวิกัยพงศ์. (2558). การสำรวจองค์ประกอบสารแคนนาบินอยด์ เพื่อจำแนกพืชกัญชาในประเทศไทย (Survey of Cannabinoids Composition For Classification of Cannabis Plants in Thailand). from <http://budgetitc.dmsc.moph.go.th/research/pdf/20131.pdf>.

ภรภัทร สุชาติกุล. (2560). การแปลผลค่าวิเคราะห์ดินและคำแนะนำการให้ปุ๋ยยางพาราสำหรับเกษตรกรทั่วไป. วารสารยางพารา, 38(3), 15-24.

มนทิรา สุขเจริญ. (2559). ผลของกรดเอทิลีนไดเอมีนเทอร์อะซีติก (อีดีทีเอ) และกรดไนตริกไฮดรอะซีติก (เอนทีเอ) ต่อการกำจัดแคดเมียมในน้ำด้วยหญ้าเนเปียร์แคระ. (วิทยานิพนธ์ปริญญา

- มหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- รุ่งทิพย์ ลุยเลา. (2562). “เฮมพ์” นวัตกรรมเพื่อการพัฒนาชุมชนและสิ่งแวดล้อมอย่างพอเพียงและยั่งยืน. วารสารสิ่งแวดล้อม, 23(3).
- วชิระ อัมพันธ์ และ ธีระ ชัยพิริยะศักดิ์. (2561). คู่มือพนักงานเจ้าหน้าที่ในการกำกับ ดูแล ซึ่งยาเสพติดให้โทษประเภท 5 เฉพาะเฮมพ์ (*Hemp*): กองควบคุมวัตถุเสพติด สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยากระทรวงสาธารณสุข.
- ศิริภาณี วงศ์กระจ่าง, และ บัญชา รัตน์ฑู. (2557). การจัดการดินกรดโดยใช้ปูนและอินทรีย์วัตถุ. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์, 6(1), 103-112.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง. (2559). คู่มือการปลูกเฮมพ์เพื่อผลิตเส้นใยภายใต้ระบบควบคุม. เชียงใหม่: วนิดาการพิมพ์.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน). (2562). กัญชง (*Hemp*) ของแม่. from <https://www.hrdi.or.th/SignificantPlant/hemp>
- สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). (2562). แสงซินโครตรอนสำหรับนักวิชาการ. from <https://www.slri.or.th/th/what-is-synchrotron-light/for-research.html>
- สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน). (2563). สถานีทดลอง BL6b: micro-XRF. from <https://www.slri.or.th/th/beamline/bl6b-micro-xrf.html>.
- สุเทพ เรื่องพิเศษ. (2558). การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพด้านเคมี. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- เอกชา ตนานนท์ชัย. (2561a). กลไกการดูดซับแคดเมียมจากน้ำเสียโดยหญ้าเนเปียร์แคระ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- เอกชา ตนานนท์ชัย. (2561b). กลไกการดูดซับแคดเมียมจากน้ำเสียโดยหญ้าเนเปียร์แคระ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- เอกชา ตนานนท์ชัย, อุดมศักดิ์ บุญมีร์ติ และ พันธวิศ สัมพันธ์พานิช. (2562). แนวทางการทดสอบความเป็นพิษผลิตภัณฑ์ “เฮมพ์” จากพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก. วารสารสิ่งแวดล้อม, 23(3).



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก ก

## สถานที่ทำการทดลองและชุดการทดลอง



ก)



ข)



ค)



ง)



จ)



ฉ)

รูปที่ ก1 ก) โรงเรือนทดลอง ชั้น 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม ข) บริเวณภายในโรงเรือนทดลอง ชั้น 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม ค) ห้องปฏิบัติการเลขที่ 318 สำหรับวิเคราะห์ตัวอย่างเฮมพ์ ชั้น 3 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม ง) ห้องปฏิบัติการเลขที่ 316 สำหรับวิเคราะห์ตัวอย่างเฮมพ์ ชั้น 3 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จ) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และ ฉ) ห้องปฏิบัติการแสงสยาม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน





ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ ก2 ชุดการทดลองที่ 30 วัน ก) ดินควบคุมที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ข) ดินควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม ค) ดินปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีดีทีเอ อัตราส่วน 1:1 โมล และ ง) ดินปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีดีทีเอ อัตราส่วน 1:2 โมล



ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 3 ชุดการทดลองที่ 60 วัน ก) ดินควบคุมที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ข) ดินควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม ค) ดินปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีทีทีเอ อัตราส่วน 1:1 โมล และ ง) ดินปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีทีทีเอ อัตราส่วน 1:2 โมล



ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 4 ชุดการทดลองที่ 90 วัน ก) ดินควบคุมที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ข) ดินควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม ค) ดินปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีดีทีเอ อัตราส่วน 1:1 โมล และ ง) ดินปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีดีทีเอ อัตราส่วน 1:2 โมล



ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ ก5 ชุดการทดลองที่ 120 วัน ก) ดินควบคุมที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม ข) ดินควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม ค) ดินปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีดีทีเอ อัตราส่วน 1:1 โมล และ ง) ดินปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีดีทีเอ อัตราส่วน 1:2 โมล

## ภาคผนวก ข

## ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินและพืชทดลอง

ตารางที่ ข1 ความเป็นกรด-ด่างของดิน

ชุดการทดลอง	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)			
	30	60	90	120
C <sub>1</sub>	7.26±0.04 <sup>b</sup>	6.61±0.09 <sup>a</sup>	7.55±0.10 <sup>b</sup>	7.89±0.06 <sup>b</sup>
C <sub>2</sub>	7.66±0.03 <sup>a</sup>	6.28±0.10 <sup>b</sup>	8.13±0.11 <sup>a</sup>	8.20±0.04 <sup>a</sup>
T <sub>1</sub>	7.65±0.09 <sup>a</sup>	6.08±0.06 <sup>c</sup>	8.00±0.05 <sup>a</sup>	8.04±0.10 <sup>ab</sup>
T <sub>2</sub>	7.76±0.06 <sup>a</sup>	6.03±0.13 <sup>c</sup>	7.49±0.10 <sup>b</sup>	7.50±0.14 <sup>c</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ ข2 ค่าการนำไฟฟ้าของดิน

ชุดการทดลอง	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)			
	30	60	90	120
C <sub>1</sub>	0.35±0.02 <sup>c</sup>	0.33±0.01 <sup>b</sup>	0.30±0.01 <sup>b</sup>	0.21±0.01 <sup>c</sup>
C <sub>2</sub>	0.40±0.03 <sup>b</sup>	0.35±0.03 <sup>b</sup>	0.31±0.02 <sup>b</sup>	0.26±0.02 <sup>bc</sup>
T <sub>1</sub>	0.41±0.04 <sup>b</sup>	0.38±0.05 <sup>ab</sup>	0.35±0.04 <sup>b</sup>	0.27±0.02 <sup>b</sup>
T <sub>2</sub>	0.55±0.02 <sup>a</sup>	0.45±0.05 <sup>a</sup>	0.43±0.06 <sup>a</sup>	0.40±0.05 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ ข3 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน

ชุดการทดลอง	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)			
	30	60	90	120
C <sub>1</sub>	308.53±2.24 <sup>c</sup>	298.17±2.10 <sup>b</sup>	218.10±1.76 <sup>c</sup>	196.97±2.85 <sup>c</sup>
C <sub>2</sub>	314.27±1.25 <sup>b</sup>	302.37±2.51 <sup>b</sup>	221.07±1.88 <sup>c</sup>	202.03±2.57 <sup>b</sup>
T <sub>1</sub>	312.00±0.72 <sup>b</sup>	301.03±2.25 <sup>b</sup>	247.20±1.70 <sup>b</sup>	206.53±2.14 <sup>b</sup>
T <sub>2</sub>	343.33±1.53 <sup>a</sup>	324.60±2.70 <sup>a</sup>	236.87±2.18 <sup>a</sup>	218.77±2.15 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ ข4 ผลของสารอีดีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในดินทดลอง

ชุดการทดลอง	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)			
	30	60	90	120
C <sub>1</sub>	0.56±0.01 <sup>b</sup>	0.52±0.01 <sup>c</sup>	0.50±0.01 <sup>d</sup>	0.47±0.02 <sup>d</sup>
C <sub>2</sub>	36.51±0.57 <sup>a</sup>	32.76±0.46 <sup>b</sup>	31.68±0.13 <sup>b</sup>	30.59±0.43 <sup>b</sup>
T <sub>1</sub>	36.48±0.98 <sup>a</sup>	32.51±0.70 <sup>b</sup>	30.58±0.36 <sup>c</sup>	30.03±0.56 <sup>c</sup>
T <sub>2</sub>	37.08±0.19 <sup>a</sup>	34.87±0.71 <sup>a</sup>	33.82±0.30 <sup>a</sup>	32.79±0.57 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ ข5 ผลของสารอีดีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในรากเฮมพ์

ชุดการทดลอง	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)			
	30	60	90	120
C <sub>1</sub>	1.69±0.25 <sup>d</sup>	4.51±0.87 <sup>d</sup>	4.48±0.22 <sup>d</sup>	5.08±0.59 <sup>d</sup>
C <sub>2</sub>	92.68±1.18 <sup>b</sup>	96.15±0.72 <sup>b</sup>	113.44±1.66 <sup>b</sup>	116.55±2.90 <sup>b</sup>
T <sub>1</sub>	98.63±1.12 <sup>a</sup>	104.45±1.14 <sup>a</sup>	116.11±1.90 <sup>a</sup>	122.07±1.36 <sup>a</sup>
T <sub>2</sub>	84.48±1.46 <sup>c</sup>	87.29±2.20 <sup>c</sup>	104.45±1.12 <sup>c</sup>	112.70±1.43 <sup>c</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ ข6 ผลของสารอีดีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในลำต้นเฮมพ์

ชุดการทดลอง	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)			
	30	60	90	120
C <sub>1</sub>	0.24±0.03 <sup>c</sup>	0.36±0.03 <sup>c</sup>	0.43±0.02 <sup>c</sup>	0.44±0.02 <sup>d</sup>
C <sub>2</sub>	0.55±0.09 <sup>a</sup>	0.91±0.06 <sup>b</sup>	1.19±0.09 <sup>b</sup>	1.53±0.03 <sup>b</sup>
T <sub>1</sub>	0.60±0.05 <sup>a</sup>	1.26±0.10 <sup>a</sup>	1.48±0.08 <sup>a</sup>	1.78±0.02 <sup>a</sup>
T <sub>2</sub>	0.40±0.08 <sup>b</sup>	0.80±0.07 <sup>b</sup>	1.12±0.09 <sup>b</sup>	1.44±0.07 <sup>c</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ ๗ ผลของสารอีดีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในเปลือก (เส้นใย) เสมพ์

ชุดการทดลอง	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)			
	30	60	90	120
C <sub>1</sub>			0.56±0.04 <sup>d</sup>	1.00±0.10 <sup>d</sup>
C <sub>2</sub>			1.76±0.09 <sup>b</sup>	2.04±0.10 <sup>b</sup>
T <sub>1</sub>			2.31±0.05 <sup>a</sup>	2.50±0.04 <sup>a</sup>
T <sub>2</sub>			1.53±0.03 <sup>c</sup>	1.70±0.02 <sup>c</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ ๘ ผลของสารอีดีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในใบเสมพ์

ชุดการทดลอง	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)			
	30	60	90	120
C <sub>1</sub>	0.13±0.07 <sup>c</sup>	0.20±0.05 <sup>c</sup>	0.38±0.01 <sup>d</sup>	0.53±0.10 <sup>d</sup>
C <sub>2</sub>	0.44±0.03 <sup>b</sup>	0.53±0.06 <sup>b</sup>	0.83±0.06 <sup>c</sup>	1.07±0.03 <sup>c</sup>
T <sub>1</sub>	0.57±0.07 <sup>a</sup>	1.24±0.10 <sup>a</sup>	1.57±0.05 <sup>a</sup>	1.86±0.04 <sup>a</sup>
T <sub>2</sub>	0.48±0.02 <sup>ab</sup>	0.64±0.07 <sup>b</sup>	1.14±0.09 <sup>b</sup>	1.37±0.06 <sup>b</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ ๙ การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนรากของเสมพ์

ชุดการทดลอง	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)			
	30	60	90	120
C <sub>1</sub>	0.036±0.00 <sup>a</sup>	0.603±0.10 <sup>a</sup>	1.417±0.02 <sup>a</sup>	2.228±0.05 <sup>a</sup>
C <sub>2</sub>	0.032±0.01 <sup>a</sup>	0.348±0.06 <sup>b</sup>	1.239±0.04 <sup>b</sup>	1.632±0.03 <sup>b</sup>
T <sub>1</sub>	0.030±0.00 <sup>a</sup>	0.276±0.00 <sup>bc</sup>	1.021±0.05 <sup>c</sup>	1.427±0.01 <sup>c</sup>
T <sub>2</sub>	0.025±0.00 <sup>a</sup>	0.177±0.10 <sup>c</sup>	0.907±0.01 <sup>d</sup>	1.127±0.03 <sup>d</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ ข10 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนลำต้นของเฮมพ์

ชุดการทดลอง	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)			
	30	60	90	120
C <sub>1</sub>	0.238±0.01 <sup>a</sup>	3.053±0.01 <sup>a</sup>	5.473±0.05 <sup>a</sup>	13.070±0.76 <sup>a</sup>
C <sub>2</sub>	0.064±0.02 <sup>b</sup>	1.922±0.08 <sup>b</sup>	5.220±0.07 <sup>b</sup>	11.713±0.21 <sup>b</sup>
T <sub>1</sub>	0.061±0.01 <sup>b</sup>	0.856±0.04 <sup>c</sup>	5.161±0.03 <sup>b</sup>	8.003±0.18 <sup>c</sup>
T <sub>2</sub>	0.059±0.03 <sup>b</sup>	0.806±0.00 <sup>c</sup>	3.664±0.08 <sup>c</sup>	6.780±0.31 <sup>d</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ ข11 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์

ชุดการทดลอง	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)			
	30	60	90	120
C <sub>1</sub>			2.360±0.23 <sup>a</sup>	4.011±0.24 <sup>a</sup>
C <sub>2</sub>			1.862±0.20 <sup>b</sup>	2.888±0.28 <sup>b</sup>
T <sub>1</sub>			1.536±0.14 <sup>bc</sup>	2.429±0.15 <sup>c</sup>
T <sub>2</sub>			1.456±0.22 <sup>c</sup>	2.353±0.10 <sup>c</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน

ตารางที่ ข12 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใบของเฮมพ์

ชุดการทดลอง	ระยะเวลาการทดลอง (วัน)			
	30	60	90	120
C <sub>1</sub>	0.278±0.09 <sup>a</sup>	3.306±0.11 <sup>a</sup>	6.407±0.06 <sup>a</sup>	9.479±0.12 <sup>a</sup>
C <sub>2</sub>	0.203±0.08 <sup>ab</sup>	1.971±0.06 <sup>b</sup>	6.403±0.04 <sup>a</sup>	9.193±0.09 <sup>b</sup>
T <sub>1</sub>	0.168±0.06 <sup>ab</sup>	1.150±0.09 <sup>c</sup>	6.300±0.12 <sup>a</sup>	8.943±0.13 <sup>c</sup>
T <sub>2</sub>	0.103±0.05 <sup>b</sup>	1.058±0.03 <sup>c</sup>	4.495±0.09 <sup>b</sup>	5.330±0.06 <sup>d</sup>

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกัน แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ต่างกัน



ตารางที่ ข13 สมดุลมวล (Mass balance) ของการดูดซับและสะสมแคดเมียมด้วยเฮมพ์ที่ปลูกในดินเป็นเวลา 30 วัน (เริ่มต้นการทดลอง)

ชุดการทดลอง	แคดเมียมเริ่มต้น	ปริมาณแคดเมียมในเฮมพ์ (มิลลิกรัม)					แคดเมียมคงเหลือในดิน (มิลลิกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในเฮมพ์ (%)					แคดเมียมคงเหลือในดิน (%)	รวมปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในระบบ (%)
		ราก	ลำต้น (แกน)	ใบ	เปลือก (เส้นใย)	รวมทั้งต้น		ราก (แกน)	ลำต้น (แกน)	ใบ	เปลือก (เส้นใย)	รวมทั้งต้น		
C <sub>1</sub>	5.56	0.0001	0.0001	0.0000	-	0.0002	5.56	0.0018	0.0000	-	0.0036	100	100.00	
C <sub>2</sub>	373.64	0.0030	0.0000	0.0001	-	0.0031	365.13	0.0008	0.0000	-	0.0008	97.72	97.72	
T <sub>1</sub>	373.64	0.0031	0.0000	0.0001	-	0.0032	364.83	0.0009	0.0000	-	0.0009	97.64	97.64	
T <sub>2</sub>	373.64	0.0020	0.0000	0.0001	-	0.0021	370.82	0.0006	0.0000	-	0.0006	99.25	99.25	

ตารางที่ ข14 สมดุลมวล (Mass balance) ของการดูดซับและสะสมแคดเมียมด้วยเฮมพ์ที่ปลูกในดินเป็นเวลา 60 วัน

ชุดการทดลอง	แคดเมียมเริ่มต้น	ปริมาณแคดเมียมในเฮมพ์ (มิลลิกรัม)					แคดเมียมคงเหลือในดิน (มิลลิกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในเฮมพ์ (%)					แคดเมียมคงเหลือในดิน (%)	รวมปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในระบบ (%)
		ราก	ลำต้น (แกน)	ใบ	เปลือก (เส้นใย)	รวมทั้งต้น		ราก (แกน)	ลำต้น (แกน)	ใบ	เปลือก (เส้นใย)	รวมทั้งต้น		
C <sub>1</sub>	5.56	0.0028	0.0011	0.0007	-	0.0046	5.23	0.0492	0.0123	-	0.0809	94.06	94.14	
C <sub>2</sub>	373.64	0.0348	0.0018	0.0009	-	0.0375	327.63	0.0093	0.0005	-	0.0100	87.69	87.70	
T <sub>1</sub>	373.64	0.0288	0.0011	0.0014	-	0.0314	325.10	0.0072	0.0003	-	0.0078	87.01	87.01	
T <sub>2</sub>	373.64	0.0155	0.0005	0.0005	-	0.0165	348.67	0.0041	0.0001	-	0.0044	93.32	93.32	

ตารางที่ ข15 สมดุลมวล (Mass balance) ของการดูดซับและสะสมแคดเมียมด้วยเยื่อที่ปลูกในดินเป็นเวลา 90 วัน

ชุดการทดลอง	แคดเมียมเริ่มต้น	ปริมาณแคดเมียมในเยื่อ (มิลลิกรัม)				แคดเมียมคงเหลือในดิน (มิลลิกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในเยื่อ (%)				แคดเมียมคงเหลือในดิน (%)	รวมปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในระบบ (%)		
		ราก	ลำต้น (แกน)	ใบ	เปลือก (เส้นใย)		รวมทั้งหมด	ราก	ลำต้น (แกน)	ใบ			เปลือก (เส้นใย)	รวมทั้งหมด
C <sub>1</sub>	5.56	0.0063	0.0023	0.0024	0.0013	0.0124	4.96	0.1133	0.0414	0.0432	0.0234	0.2230	89.21	89.43
C <sub>2</sub>	373.64	0.1405	0.0062	0.0055	0.0037	0.1559	316.83	0.0376	0.0017	0.0015	0.0009	0.0417	84.80	84.84
T <sub>1</sub>	373.64	0.1164	0.0081	0.0082	0.0030	0.1357	305.77	0.0311	0.0022	0.0022	0.0008	0.0363	81.84	81.88
T <sub>2</sub>	373.64	0.0937	0.0041	0.0053	0.0021	0.1053	338.17	0.0251	0.0011	0.0014	0.0006	0.0282	90.51	90.54

ตารางที่ ข16 สมดุลมวล (Mass balance) ของการดูดซับและสะสมแคดเมียมด้วยเยื่อที่ปลูกในดินเป็นเวลา 120 วัน

ชุดการทดลอง	แคดเมียมเริ่มต้น	ปริมาณแคดเมียมในเยื่อ (มิลลิกรัม)				แคดเมียมคงเหลือในดิน (มิลลิกรัม)	ปริมาณแคดเมียมในเยื่อ (%)				แคดเมียมคงเหลือในดิน (%)	รวมปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในระบบ (%)		
		ราก	ลำต้น (แกน)	ใบ	เปลือก (เส้นใย)		รวมทั้งหมด	ราก	ลำต้น (แกน)	ใบ			เปลือก (เส้นใย)	รวมทั้งหมด
C <sub>1</sub>	5.56	0.0113	0.0058	0.0051	0.0040	0.0262	4.69	0.2031	0.1042	0.0916	0.0719	0.4710	84.32	84.79
C <sub>2</sub>	373.64	0.1904	0.0179	0.0098	0.0059	0.2238	305.90	0.0509	0.0047	0.0026	0.0015	0.0599	81.87	81.93
T <sub>1</sub>	373.64	0.1741	0.0143	0.0166	0.0061	0.2111	296.97	0.0466	0.0038	0.0044	0.0016	0.0565	79.48	79.90
T <sub>2</sub>	373.64	0.1271	0.0098	0.0073	0.0040	0.1481	327.87	0.0339	0.0026	0.0019	0.0010	0.0396	87.75	87.79

ภาคผนวก ค

ข้อมูลทางสถิติ

1. การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมี และปริมาณการสะสมแคดเมียมของดินหลังทำการทดลอง

ตารางที่ ค1 ความเป็นกรด-ด่างของดิน วันที่ 30

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05	
		1	2
C <sub>1</sub>	3	7.2567	
T <sub>1</sub>	3		7.6500
C <sub>2</sub>	3		7.6633
T <sub>2</sub>	3		7.7600

ตารางที่ ค2 ความเป็นกรด-ด่างของดิน วันที่ 60

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05		
		1	2	3
T <sub>2</sub>	3	6.0333		
T <sub>1</sub>	3	6.0833		
C <sub>2</sub>	3		6.2800	
C <sub>1</sub>	3			6.6133

ตารางที่ ค3 ความเป็นกรด-ด่างของดิน วันที่ 90

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05	
		1	2
T <sub>2</sub>	3	7.4867	
C <sub>1</sub>	3	7.5533	
T <sub>1</sub>	3		8.0000
C <sub>2</sub>	3		8.1267

ตารางที่ ค4 ความเป็นกรด-ด่างของดิน วันที่ 120

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05		
		1	2	3
T <sub>2</sub>	3	7.5000		
C <sub>1</sub>	3		7.8867	
T <sub>1</sub>	3		8.0433	8.0433
C <sub>2</sub>	3			8.2000

ตารางที่ ค5 การนำไฟฟ้าของดิน วันที่ 30

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05		
		1	2	3
C <sub>1</sub>	3	.3500		
C <sub>2</sub>	3		.4033	
T <sub>1</sub>	3		.4067	
T <sub>2</sub>	3			.5633

ตารางที่ ค6 การนำไฟฟ้าของดิน วันที่ 60

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05	
		1	2
C <sub>1</sub>	3	.3267	
C <sub>2</sub>	3	.3533	
T <sub>1</sub>	3	.3833	.3833
T <sub>2</sub>	3		.4467

ตารางที่ ค7 การนำไฟฟ้าของดิน วันที่ 90

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05	
		1	2
C <sub>1</sub>	3	.3033	.4367
C <sub>2</sub>	3	.3133	
T <sub>1</sub>	3	.3533	
T <sub>2</sub>	3		

ตารางที่ ค8 การนำไฟฟ้าของดิน วันที่ 120

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05			
		1	2	3	
C <sub>1</sub>	3	.2133	.2733	.3967	
C <sub>2</sub>	3	.2600			.2600
T <sub>1</sub>	3				
T <sub>2</sub>	3				

ตารางที่ ค9 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ของดิน วันที่ 30

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05		
		1	2	3
C <sub>1</sub>	3	308.5333	312.0000	343.3333
T <sub>1</sub>	3			
C <sub>2</sub>	3		314.2667	
T <sub>2</sub>	3			

ตารางที่ ค10 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ของดิน วันที่ 60

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05	
		1	2
C <sub>1</sub>	3	298.1667	324.6000
T <sub>1</sub>	3	301.0333	
C <sub>2</sub>	3	302.3667	
T <sub>2</sub>	3		

ตารางที่ ค11 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ของดิน วันที่ 90

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05	
		1	2
C <sub>1</sub>	3	218.1000	244.8667
C <sub>2</sub>	3	221.0667	
T <sub>2</sub>	3	229.5333	
T <sub>1</sub>	3		

ตารางที่ ค12 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ของดิน วันที่ 120

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05		
		1	2	3
C <sub>1</sub>	3	196.9667	202.0333	218.7667
C <sub>2</sub>	3			
T <sub>1</sub>	3		206.5333	
T <sub>2</sub>	3			

ตารางที่ ค13 การสะสมแคดเมียมในดินทดลอง วันที่ 30

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05	
		1	2
C <sub>1</sub>	3	.5567	
T <sub>1</sub>	3		36.4867
C <sub>2</sub>	3		36.5133
T <sub>2</sub>	3		37.0833

ตารางที่ ค14 การสะสมแคดเมียมในดินทดลอง วันที่ 60

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05		
		1	2	3
C <sub>1</sub>	3	.5267		
T <sub>1</sub>	3		32.5100	
C <sub>2</sub>	3		32.7633	
T <sub>2</sub>	3			34.8667

ตารางที่ ค15 การสะสมแคดเมียมในดินทดลอง วันที่ 90

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
C <sub>1</sub>	3	.4967			
T <sub>1</sub>	3		30.5767		
C <sub>2</sub>	3			31.6833	
T <sub>2</sub>	3				33.8167

ตารางที่ ค16 การสะสมแคดเมียมในดินทดลอง วันที่ 120

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
C <sub>1</sub>	3	.4700			
T <sub>1</sub>	3		29.6967		
C <sub>2</sub>	3			30.5900	
T <sub>2</sub>	3				32.7867

ตารางที่ ค17 การสะสมแคดเมียมในรากของเฮมพ์ วันที่ 30

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
C <sub>1</sub>	3	1.6933			
T <sub>2</sub>	3		84.4833		
C <sub>2</sub>	3			92.6823	
T <sub>1</sub>	3				103.6283

ตารางที่ ค18 การสะสมแคดเมียมในรากของเฮมพ์ วันที่ 60

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
C <sub>1</sub>	3	4.5110			
T <sub>2</sub>	3		87.2853		
C <sub>2</sub>	3			96.1460	
T <sub>1</sub>	3				104.4487



ตารางที่ ค19 การสะสมแคดเมียมในรากของเฮมพ์ วันที่ 90

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
C <sub>1</sub>	3	4.4763			
T <sub>2</sub>	3		104.4510		
C <sub>2</sub>	3			113.4427	
T <sub>1</sub>	3				116.1067

ตารางที่ ค20 การสะสมแคดเมียมในรากของเฮมพ์ วันที่ 120

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
C <sub>1</sub>	3	5.0830			
T <sub>2</sub>	3		112.7043		
C <sub>2</sub>	3			116.5533	
T <sub>1</sub>	3				122.0720

ตารางที่ ค21 การสะสมแคดเมียมในลำต้นของเฮมพ์ วันที่ 30

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05		
		1	2	3
C <sub>1</sub>	3	.2437		
T <sub>2</sub>	3		.3983	
C <sub>2</sub>	3			.5450
T <sub>1</sub>	3			.5983

ตารางที่ ค22 การสะสมแคดเมียมในลำต้นของเฮมพ์ วันที่ 60

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05		
		1	2	3
C <sub>1</sub>	3	.3610		
T <sub>2</sub>	3		.7950	
C <sub>2</sub>	3		.9120	
T <sub>1</sub>	3			1.2593

ตารางที่ ค23 การสะสมแคดเมียมในลำต้นของเฮมพ์ วันที่ 90

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05		
		1	2	3
C <sub>1</sub>	3	.4287		
T <sub>2</sub>	3		1.1170	
C <sub>2</sub>	3		1.1907	
T <sub>1</sub>	3			1.4777

ตารางที่ ค24 การสะสมแคดเมียมในลำต้นของเฮมพ์ วันที่ 120

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
C <sub>1</sub>	3	.4447			
T <sub>2</sub>	3		1.4367		
C <sub>2</sub>	3			1.5273	
T <sub>1</sub>	3				1.7833

ตารางที่ ค25 การสะสมแคดเมียมในเปลือกของแฮมพ์ วันที่ 90

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05		
		1	2	3
T <sub>2</sub>	3	1.4555		
T <sub>1</sub>	3	1.5359	1.5359	
C <sub>2</sub>	3		1.8616	
C <sub>1</sub>	3			2.3596

ตารางที่ ค26 การสะสมแคดเมียมในเปลือกของแฮมพ์ วันที่ 120

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05		
		1	2	3
T <sub>2</sub>	3	2.3534		
T <sub>1</sub>	3	2.4289		
C <sub>2</sub>	3		2.8880	
C <sub>1</sub>	3			4.0113

ตารางที่ ค27 การสะสมแคดเมียมในใบของแฮมพ์ วันที่ 30

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05	
		1	2
T <sub>2</sub>	3	.1030	
T <sub>1</sub>	3	.1681	.1681
C <sub>2</sub>	3	.2028	.2028
C <sub>1</sub>	3		.2784

ตารางที่ ค28 การสะสมแคดเมียมในใบของเฮมพ์ วันที่ 60

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05		
		1	2	3
T <sub>2</sub>	3	1.0578	1.9709	3.3061
T <sub>1</sub>	3	1.1501		
C <sub>2</sub>	3			
C <sub>1</sub>	3			

ตารางที่ ค29 การสะสมแคดเมียมในใบของเฮมพ์ วันที่ 90

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05	
		1	2
T <sub>2</sub>	3	4.4950	6.4066
T <sub>1</sub>	3		
C <sub>2</sub>	3		
C <sub>1</sub>	3		

ตารางที่ ค30 การสะสมแคดเมียมในใบของเฮมพ์ วันที่ 120

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
T <sub>2</sub>	3	5.3300	8.9433	9.1933	9.4789
T <sub>1</sub>	3				
C <sub>2</sub>	3				
C <sub>1</sub>	3				

ตารางที่ ค31 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนรากของเฮมพ์ วันที่ 30

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05
		1
T <sub>2</sub>	3	.0253
T <sub>1</sub>	3	.0296
C <sub>2</sub>	3	.0320
C <sub>1</sub>	3	.0356

ตารางที่ ค32 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนรากของเฮมพ์ วันที่ 60

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05		
		1	2	3
T <sub>2</sub>	3	.1772		
T <sub>1</sub>	3	.2765	.2765	
C <sub>2</sub>	3		.3479	
C <sub>1</sub>	3			.6034

ตารางที่ ค33 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนรากของเฮมพ์ วันที่ 90

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subste for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
T <sub>2</sub>	3	.9065			
T <sub>1</sub>	3		1.0210		
C <sub>2</sub>	3			1.2387	
C <sub>1</sub>	3				1.4174

ตารางที่ ค34 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนรากของเฮมพ์ วันที่ 120

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
T <sub>2</sub>	3	1.1272			
T <sub>1</sub>	3		1.4265		
C <sub>2</sub>	3			1.6316	
C <sub>1</sub>	3				2.2281

ตารางที่ ค35 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนลำต้นของเฮมพ์ วันที่ 30

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
T <sub>2</sub>	3	.0595	
T <sub>1</sub>	3	.0605	
C <sub>2</sub>	3	.0643	
C <sub>1</sub>	3		.2385

ตารางที่ ค36 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนลำต้นของเฮมพ์ วันที่ 60

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
T <sub>2</sub>	3	.8064		
T <sub>1</sub>	3	.8559		
C <sub>2</sub>	3		1.9225	
C <sub>1</sub>	3			3.0530

ตารางที่ ค37 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนลำต้นของเฮมพ์ วันที่ 90

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
T <sub>2</sub>	3	3.6642		
T <sub>1</sub>	3		5.1614	
C <sub>2</sub>	3		5.2202	
C <sub>1</sub>	3			5.4729

ตารางที่ ค38 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนลำต้นของเฮมพ์ วันที่ 120

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
T <sub>2</sub>	3	6.7800			
T <sub>1</sub>	3		8.0033		
C <sub>2</sub>	3			11.7126	
C <sub>1</sub>	3				13.0700

ตารางที่ ค39 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์ วันที่ 90

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
T <sub>2</sub>	3	1.4555		
T <sub>1</sub>	3	1.5359	1.5359	
C <sub>2</sub>	3		1.8616	
C <sub>1</sub>	3			2.3596

ตารางที่ ค40 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์ วันที่ 120

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
T <sub>2</sub>	3	2.3534		
T <sub>1</sub>	3	2.4289		
C <sub>2</sub>	3		2.8880	
C <sub>1</sub>	3			4.0113

ตารางที่ ค41 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใบของเฮมพ์ วันที่ 30

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
T <sub>2</sub>	3	.1030	
T <sub>1</sub>	3	.1681	.1681
C <sub>2</sub>	3	.2028	.2028
C <sub>1</sub>	3		.2784

ตารางที่ ค42 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใบของเฮมพ์ วันที่ 60

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
T <sub>2</sub>	3	1.0578		
T <sub>1</sub>	3	1.1501		
C <sub>2</sub>	3		1.9709	
C <sub>1</sub>	3			3.3061



ตารางที่ ค43 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใบของเฮมพ์ วันที่ 90

Duncan<sup>a</sup>

ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
T <sub>2</sub>	3	4.4950	
T <sub>1</sub>	3		6.2999
C <sub>2</sub>	3		6.4027
C <sub>1</sub>	3		6.4066

ตารางที่ ค44 การเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งในส่วนใบของเฮมพ์ วันที่ 120

Duncan<sup>a</sup>

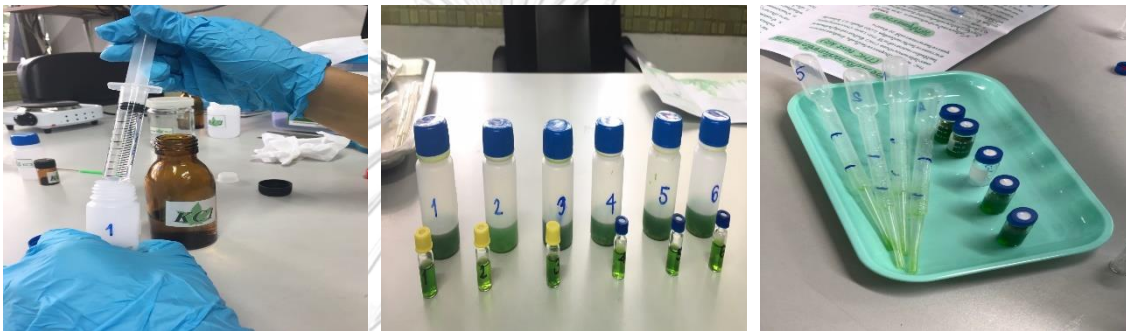
ชุดการทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
T <sub>2</sub>	3	5.3300			
T <sub>1</sub>	3		8.9433		
C <sub>2</sub>	3			9.1933	
C <sub>1</sub>	3				9.4789

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ปริมาณสารเตตราไฮโดรแคนนาบินอล



การตรวจวัดปริมาณที่เอชซีภาคสนาม (THC Test Kit) เสมพ์



การตรวจวัดปริมาณที่เอชซีภาคสนาม (THC Test Kit) เสมพ์



การตรวจวัดปริมาณที่เอชซีภาคสนาม (THC Test Kit) เสมพ์



การเทียบผลบนแผ่นทดสอบกับแผ่นเทียบสารมาตรฐาน THC  
รูปที่ ง1 การวิเคราะห์ปริมาณสารเตตราไฮโดรแคนนาบินอล

## ภาคผนวก จ

## การวิเคราะห์และทดสอบความเป็นพิษของเฮมพ์

ตารางที่ จ1 ดัชนีความเป็นพิษ (HI) ที่ก่อให้เกิดโรคอื่นที่ไม่ใช่โรคมะเร็ง (Noncarcinogen) ในส่วนเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์ ที่ระยะเวลา 90-120 วัน

ปริมาณฝุ่นที่ได้รับ (มิลลิกรัมต่อวัน)		ดัชนีความเป็นพิษก่อให้เกิดโรคอื่นที่ไม่ใช่มะเร็ง (Noncarcinogen)			
ส่วนเปลือก (เส้นใย) (90 วัน)		HI-Male C <sub>1</sub>	HI-Male C <sub>2</sub>	HI-Male T <sub>1</sub>	HI-Male T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	2.59E-08	1.31E-07	7.99E-08	8.40E-08
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	1.94E-07	9.83E-07	5.99E-07	6.30E-07
ขั้นสูง	50.00	3.24E-07	1.64E-06	9.99E-07	1.05E-06
ส่วนเปลือก (เส้นใย) (90 วัน)		HI-Female C <sub>1</sub>	HI-Female C <sub>2</sub>	HI-Female T <sub>1</sub>	HI-Female T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	3.10E-08	1.57E-07	9.55E-08	1.00E-07
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	2.32E-07	1.17E-06	7.16E-07	7.53E-07
ขั้นสูง	50.00	3.87E-07	1.96E-06	1.19E-06	1.25E-06
ส่วนเปลือก (เส้นใย) (120 วัน)		HI-Male C <sub>1</sub>	HI-Male C <sub>2</sub>	HI-Male T <sub>1</sub>	HI-Male T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	2.60E-08	1.21E-07	1.69E-07	1.85E-07
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	1.95E-07	9.07E-07	1.27E-06	1.39E-06
ขั้นสูง	50.00	3.26E-07	1.51E-06	2.11E-06	2.32E-06
ส่วนเปลือก (เส้นใย) (120 วัน)		HI-Female C <sub>1</sub>	HI-Female C <sub>2</sub>	HI-Female T <sub>1</sub>	HI-Female T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	3.11E-08	1.44E-07	2.02E-07	2.21E-07
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	2.33E-07	1.08E-06	1.51E-06	1.66E-06
ขั้นสูง	50.00	3.89E-07	1.80E-06	2.52E-06	2.77E-06

ตารางที่ จ2 ดัชนีความเป็นพิษ (HI) ที่ก่อให้เกิดโรคอื่นที่ไม่ใช่โรคมะเร็ง (Noncarcinogen) ในส่วน  
แกนของเฮมพ์ ที่ระยะเวลา 90-120 วัน

ส่วนลำต้น (แกน) (90 วัน)		HI-Male C <sub>1</sub>	HI-Male C <sub>2</sub>	HI-Male T <sub>1</sub>	HI-Male T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	1.74E-08	6.55E-08	7.96E-08	4.74E-08
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	1.31E-07	4.92E-07	5.97E-07	3.56E-07
ขั้นสูง	50.00	2.18E-07	8.19E-07	9.95E-07	5.93E-07
ส่วนลำต้น (แกน) (90 วัน)		HI-Female C <sub>1</sub>	HI-Female C <sub>2</sub>	HI-Female T <sub>1</sub>	HI-Female T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	2.08E-08	7.83E-08	9.51E-08	5.66E-08
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	1.56E-07	5.87E-07	7.13E-07	4.25E-07
ขั้นสูง	50.00	2.60E-07	9.79E-07	1.19E-06	7.08E-07
ส่วนลำต้น (แกน) (120 วัน)		HI-Male C <sub>1</sub>	HI-Male C <sub>2</sub>	HI-Male T <sub>1</sub>	HI-Male T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	2.47E-08	1.08E-07	1.17E-07	1.09E-07
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	1.86E-07	8.11E-07	8.76E-07	8.15E-07
ขั้นสูง	50.00	3.09E-07	1.35E-06	1.46E-06	1.36E-06
ส่วนลำต้น (แกน) (120 วัน)		HI-Female C <sub>1</sub>	HI-Female C <sub>2</sub>	HI-Female T <sub>1</sub>	HI-Female T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	2.96E-08	1.29E-07	1.39E-07	1.30E-07
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	2.22E-07	9.69E-07	1.05E-06	9.73E-07
ขั้นสูง	50.00	3.69E-07	1.61E-06	1.74E-06	1.62E-06

ตารางที่ ๓3 ดัชนีความเป็นพิษ (HI) ที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Carcinogen) ในส่วนเปลือก (เส้นใย) ของ  
เฮมพ์ ที่ระยะเวลา 90-120 วัน

ปริมาณฝุ่นที่ได้รับ (มิลลิกรัมต่อวัน)		ดัชนีความเป็นพิษก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Carcinogen)			
ส่วนเปลือก (เส้นใย) (90 วัน)		HI-Male C <sub>1</sub>	HI-Male C <sub>2</sub>	HI-Male T <sub>1</sub>	HI-Male T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	9.85E-12	4.98E-11	3.04E-11	3.19E-11
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	7.39E-11	3.74E-10	2.28E-10	2.39E-10
ขั้นสูง	50.00	1.23E-10	6.23E-10	3.80E-10	3.99E-10
ส่วนเปลือก (เส้นใย) (90 วัน)		HI-Female C <sub>1</sub>	HI-Female C <sub>2</sub>	HI-Female T <sub>1</sub>	HI-Female T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	1.18E-11	5.95E-11	3.63E-11	3.81E-11
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	8.83E-11	4.46E-10	2.72E-10	2.86E-10
ขั้นสูง	50.00	1.47E-10	7.44E-10	4.54E-10	4.77E-10
ส่วนเปลือก (เส้นใย) (120 วัน)		HI-Male C <sub>1</sub>	HI-Male C <sub>2</sub>	HI-Male T <sub>1</sub>	HI-Male T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	9.90E-12	4.59E-11	6.42E-11	7.04E-11
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	7.42E-11	3.45E-10	4.81E-10	5.28E-10
ขั้นสูง	50.00	1.24E-10	5.74E-10	8.02E-10	8.81E-10
ส่วนเปลือก (เส้นใย) (120 วัน)		HI-Female C <sub>1</sub>	HI-Female C <sub>2</sub>	HI-Female T <sub>1</sub>	HI-Female T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	1.18E-11	5.49E-11	7.67E-11	8.41E-11
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	8.87E-11	4.12E-10	5.75E-10	6.31E-10
ขั้นสูง	50.00	1.48E-10	6.86E-10	9.58E-10	1.05E-09

ตารางที่ 4 ดัชนีความเป็นพิษ (HI) ที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Carcinogen) ในส่วนแกนของเฮมพ์ ที่ระยะเวลา 90-120 วัน

ปริมาณฝุ่นที่ได้รับ (มิลลิกรัมต่อวัน)		ดัชนีความเป็นพิษก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Carcinogen)			
ส่วนลำต้น (แกน) (90 วัน)		HI-Male	HI-Male	HI-Male	HI-Male
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	6.62E-12	2.49E-11	3.03E-11	1.80E-11
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	4.96E-11	1.87E-10	2.27E-10	1.35E-10
ขั้นสูง	50.00	8.27E-11	3.11E-10	3.78E-10	2.25E-10
ส่วนลำต้น (แกน) (90 วัน)		HI-Female	HI-Female	HI-Female	HI-Female
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	7.91E-12	2.97E-11	3.61E-11	2.15E-11
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	5.93E-11	2.23E-10	2.71E-10	1.61E-10
ขั้นสูง	50.00	9.88E-11	3.72E-10	4.52E-10	2.69E-10
ส่วนลำต้น (แกน) (120 วัน)		HI-Male	HI-Male	HI-Male	HI-Male
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	9.40E-12	4.11E-11	4.44E-11	4.13E-11
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	7.05E-11	3.08E-10	3.33E-10	3.10E-10
ขั้นสูง	50.00	1.18E-10	5.14E-10	5.55E-10	5.16E-10
ส่วนลำต้น (แกน) (120 วัน)		HI-Female	HI-Female	HI-Female	HI-Female
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
ขั้นต่ำ	4.00	1.12E-11	4.91E-11	5.30E-11	4.93E-11
ขั้นค่าเฉลี่ย	30.00	8.42E-11	3.68E-10	3.97E-10	3.70E-10
ขั้นสูง	50.00	1.40E-10	6.13E-10	6.62E-10	6.16E-10

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อชิรญาณ คณศรัทธพงษ์
วัน เดือน ปี เกิด	16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2538
สถานที่เกิด	นนทบุรี, ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้า คุณทหารลาดกระบัง
ที่อยู่ปัจจุบัน	47/185 ม.สีวลี ซ.7/2 ต.บางพูด อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120
ผลงานตีพิมพ์	1) อชิรญาณ คณศรัทธพงษ์ และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. (2563). “เฮมพ์”...พืชพื้นฟูดินปนเปื้อนสารพิษสู่นวัตกรรมผลิตภัณฑ์ชุมชน... ยุค Thailand 4.0. วารสารสิ่งแวดล้อม, ปีที่ 24 (ฉบับที่ 3). 2) อชิรญาณ คณศรัทธพงษ์ และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. (2563). การ ประยุกต์ใช้สารอีทีทีเอต่อการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียมด้วยเฮมพ์. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 26(2).