วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 26 (ฉบับที่ 2) พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2564
BURAPHA SCIENCE JOURNAL Volume 26 (No.2) May – August 2021 บทความวิจัย

ผลของสารอีดีทีเอต่อการบำบัดดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยเฮมพ์

Effect of EDTA on Cadmium Contaminated Soil Remediation by Hemp (*Cannabis sativa*)

อชิรญาณ์ คเณศรักษพงษ์[1] และ พันธวัศ สัมพันธ์พานิช[2*]

Achiraya Kanedrukpong[1] and Pantawat Sampanpanish[2*]

[1]*สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*

[2]*สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*

[1]*Interdisciplinary Program in Environmental Science, Graduate School, Chulalongkorn University*

[2]*Environmental Research Institute, Chulalongkorn University*

Received : 7 August 2020

Revised : 12 September 2020

Accepted : 7 October 2020

บทคัดย่อ

การศึกษาประสิทธิภาพของสารอีดีทีเอต่อการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมด้วยเฮมพ์ (Hemp) หรือ กัญชง สายพันธุ์ *Cannabis sativa* L.ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุมที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม (C_1) ชุดควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม (C_2) ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียม และเติมสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:1 โมล (T_1) และชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมสารอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:2 โมล (T_2) พบว่า สารอีดีทีเอมีประสิทธิภาพในการรวมตัวกับแคดเมียมแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่อยู่ในรูปง่ายต่อการดูดดึงของพืช และพบว่า ชุดการทดลอง T_1 พืชมีการสะสมแคดเมียมสูงที่สุดตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยพบว่า พืชมีการสะสมแคดเมียมสูงสุดที่ราก รองลงมาคือ ลำต้นและใบ สำหรับชุดการทดลอง T_2 ซึ่งมีการเติมสารอีดีทีเอในปริมาณความเข้มข้นสูง พบว่า พืชมีการสะสมแคดเมียมในรากเท่ากับ 111.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าชุดการทดลอง T_1 และ C_2 ที่มีค่าการสะสมแคดเมียมในรากเท่ากับ 120.74 และ 116.55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เนื่องจากการเติมสารอีดีทีเอในปริมาณความเข้มข้นสูงส่งผลกระทบทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช ทำให้พืชมีการดูดดึงแร่ธาตุลดลง นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในส่วนเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์ พบว่า มีการสะสมแคดเมียมในส่วนเปลือก (เส้นใย) ต่ำ ดังนั้นผลการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปใช้บำบัดดินปนเปื้อนในพื้นที่จริงได้ อีกทั้งใช้เป็นแนวทางเลือกในการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากเฮมพ์ที่ผ่านการปลูกบนดินปนเปื้อนมาเป็นผลิตภัณฑ์ชุมชน เพื่อสร้างเสริมรายได้อันจะนำไปสู่คุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นของชุมชนได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : เฮมพ์ ; แคดเมียม ; อีดีทีเอ ; การบำบัดดินด้วยพืช ; ความเป็นพิษของพืช

Abstract

This research aims to study the efficiency of EDTA on the restoration of cadmium-contaminated areas by hemp (*Cannabis sativa* L.). 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 at the mole ratio of 1:1 (T_1), and cadmium-contaminated soil with EDTA at the mole ratio of 1:2 (T_2). The results showed that EDTA was effective to form the complex with cadmium which resulted in the ease of plant absorption. The highest cadmium accumulation throughout the experiment period was found in T_1 in which cadmium accumulation in roots was higher than that of trunks and leaves. However, the cadmium accumulation in the roots of plant grown in T_2 (111.37 milligrams per kilogram) was lower than those grown in T_1 (120.74 milligrams per kilogram) and C_2 (116.55 milligrams per kilogram). This may be caused by the phytotoxicity effects of higher EDTA molar application to the soil. As a consequence, lower cadmium accumulation was found in T_2 comparing to the other experimental sets. Low cadmium accumulations in fibers were found in all experimental sets. The results of this study can be used as an alternative remediation technique to restore the cadmium-contaminated soil. In addition, some local products made by the fibers of the hemp can also improve the economic status of the community. As a consequence, the sustainable development in the area can be reached.

Keywords : hemp ; cadmium ; EDTA ; phytoremediation ; phytotoxicity

***Corresponding author. E-mail :** pantawat.s@chula.ac.th

บทนำ

จากการสำรวจพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมในดินและผลผลิตทางการเกษตรของสถาบันจัดการทรัพยากรน้ำนานาชาติ (International Water Management Institute; IWMI) ร่วมกับกรมวิชาการเกษตร (Department of agriculture; DOA) ในระหว่างปี พ.ศ.2541-2546 พบว่า ในดินแปลงนาบริเวณอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก มีการปนเปื้อนแคดเมียมเท่ากับ 3.4-284 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดิน สำหรับใช้เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมที่กำหนดให้มีค่าแคดเมียมปนเปื้อนได้ไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Notification of The National Environmental Board No.25, 2004) อีกทั้งยังพบว่า 90% ของตัวอย่างข้าวที่สุ่มตรวจมีปริมาณแคดเมียมสะสมเท่ากับ 0.1-4.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นค่าที่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดให้มีค่าสะสมแคดเมียมในข้าวได้ไม่เกิน 0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Codex, 2015) แคดเมียมเป็นธาตุโลหะหนักที่มีความเป็นพิษที่สามารถสะสมภายในอวัยวะ และก่อให้เกิดโรคเรื้อรังได้ (Gavrilescu, 2004) เช่น โรคอิไต-อิไต โรคตับ และแคดเมียมยังก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบประสาทด้วย ปัจจุบันปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ยังไม่ได้รับการแก้ไขให้หมดความกังวลใจของชุมชนในพื้นที่ได้ เนื่องจากพื้นที่มีหินที่มีสินแร่สังกะสีเป็นองค์ประกอบ และมีแคดเมียมเป็นสิ่งเจือปน ดังนั้นเมื่อหินพื้นเกิดการผุพังทางธรรมชาติ ประกอบกับได้รับการกระตุ้นจากกิจกรรมของมนุษย์ก็จะมีการปลดปล่อยสังกะสีและแคดเมียมออกสู่สิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องหาวิธีจัดการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียมด้วยพืช (Phytoremediation) เป็นแนวทางเลือกหรือวิธีการที่น่าสนใจและมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีที่ช่วยบำบัดสารพิษออกจากดินได้ โดยมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำ และมีทัศนียภาพดีเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Sampanpanish, 2015) นอกจากนี้การนำสารคีเลต คือ อีดีทีเอ มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการปลูกพืชจะช่วยให้พืชสามารถดูดดึงสะสมโลหะหนักได้มากขึ้น (Chen *et al*., 2004; Abdel-Salam, 2012)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพของอีดีทีเอ (Ethylene Diamine Tetraacetic; EDTA) ต่อการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียมด้วยเฮมพ์ (Hemp) หรือกัญชง สายพันธุ์ *Cannabis sativa* L. เพราะเป็นพืชที่ปลูกง่าย โตเร็ว ง่ายต่อการดูแลรักษา โรคแมลงเข้าทำลายน้อย และเฮมพ์ยังเป็นพืชล้มลุกมีอายุเพียงปีเดียว มีระบบรากแก้วและรากแขนงสามารถช่วยฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนสารพิษได้ นอกจากนี้เฮมพ์ยังเป็นพืชที่ให้ผลผลิตเป็นเส้นใยที่มีคุณภาพสูง สามารถนำไปประยุกต์หรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชุมชนที่สามารถสร้างอาชีพ รายได้ และคุณภาพชีวิตที่ดีของชุมชนได้อย่างรูปธรรมและยั่งยืน

วิธีดำเนินการวิจัย

การบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียมด้วยเฮมพ์ร่วมกับการเติมอีดีทีเอ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การเก็บตัวอย่างดินโดยขุดดินมาจากพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก และแบ่งดินออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ 1) ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม และ 2) ดินปนเปื้อนแคดเมียม ทำการศึกษาในโรงเรือนเพาะชำ อาคารสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย นำดินผึ่งในที่ร่มให้แห้ง ทำการบดและย่อย จากนั้นบรรจุใส่ในกระถางพลาสติกปริมาณ 10 กิโลกรัมต่อกระถาง และทำการวิเคราะห์สมบัติดินเบื้องต้น

2. ผสมอีดีทีเอกับดินทดลอง โดยสัดส่วนระหว่างดินต่ออีดีทีเอ ($C_6H_{12}N_2O_8$) ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ อัตราส่วน 1:1 และ 1:2 โมล ซึ่งแต่ละสัดส่วนของอีดีทีเอที่เติมลงไปมีจำนวน 12 กระถาง และชุดดินควบคุมที่ปนเปื้อน และไม่ปนเปื้อน จำนวนชุดละ 12 กระถาง รวมทั้งหมด 4 ชุดการทดลองจำนวน 48 กระถาง

3. การปลูกพืชทดลอง พืชศึกษา คือ เฮมพ์ (Hemp) สายพันธุ์ *Cannabis sativa* L. ซึ่งได้รับการอนุญาตปลูกเพื่อการวิจัย จากสำนักงานอาหารและยา (อย.) และได้เมล็ดพันธุ์เฮมพ์รับรองจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) หรือ สวพส. โดยนำเมล็ดเฮมพ์เพาะลงกระถางทดลอง หลังเมล็ดงอกได้ทำการคัดเลือกให้เหลือต้นที่แข็งแรงเพียง 3 ต้นต่อกระถาง และทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยชุดการทดลองทั้งหมด สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชุดการทดลองและสัญลักษณ์

ชุดการทดลอง	สัญลักษณ์
1. ชุดควบคุมที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม	C_1
2. ชุดควบคุมที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม	C_2
3. ดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:1 โมล	T_1
4. ดินปนเปื้อนแคดเมียมและเติมอีดีทีเอ ในอัตราส่วน 1:2 โมล	T_2

4. ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 120 วัน โดยทำการเก็บตัวอย่างดินและพืชทุก ๆ 30 วัน ตลอดระยะเวลาการทดลอง คือ 30, 60, 90 และ 120 วัน

5. การวิเคราะห์ปริมาณการสะสมแคดเมียมในเฮมพ์ โดยนำตัวอย่างเฮมพ์มาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปา 3-4 ครั้ง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และแบ่งตัวอย่างพืชออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ราก ลำต้น (เปลือกและแกน) และใบ (สำหรับตัวอย่างพืชที่เก็บใน 90 และ 120 วัน ทำการแบ่งตัวอย่างพืชออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ราก เปลือก แกน และใบ) นำพืชมาชั่งน้ำหนักสด และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบ ชั่งน้ำหนักแห้งและทำการบดแบบแยกส่วนให้ละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียม ด้วยวิธีการตาม USEPA method 3052 (USEPA, 1996) โดยทำการย่อยด้วยเครื่องระบบไมโครเวฟ (Microwave Digestion) และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES)

สำหรับการวิเคราะห์ดิน ได้ทำการแบ่งตัวอย่างดินออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1) นำดินไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม ด้วยวิธีการตาม USEPA method 3051A (USEPA, 2007) โดยย่อยด้วยเครื่องระบบไมโครเวฟ และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES และส่วนที่ 2) นำตัวอย่างดินมาผึ่งให้แห้งในที่ร่มด้วยอุณหภูมิห้อง แล้วทำการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า และศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน

6. ทำการบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโต (มวลชีวภาพ) และหาอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (Relative Growth Rate; RGR) จากสูตรที่ 1 ดังต่อไปนี้ (Hunt, 2002)

$$RGR = [Ln(W_2) - Ln(W_1)] / (t_2-t_1) \quad (1)$$

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

7. การทดสอบความเป็นพิษของพืช โดยทำการวิเคราะห์ส่วนเปลือก (เส้นใย) และแกน ในช่วงที่สามารถนำต้นเฮมพ์มาใช้ประโยชน์ได้ (90 และ 120 วัน) ด้วยการเตรียมตัวอย่างพืชด้วยวิธีการเผาให้เป็นเถ้า (Dry Ashing หรือ Dry Oxidation) และละลายด้วยกรดที่เหมาะสม โดยนำพืชมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปาแล้วตามด้วยน้ำกลั่น จากนั้นผึ่งให้แห้ง ลอกเปลือกออกจากแกนของเฮมพ์แล้วนำทั้ง 2 ส่วนมาตัดเป็นท่อนสั้น ๆ ประมาณ 0.5-1 เซนติเมตร แล้วทำการชั่งน้ำหนักสด นำตัวอย่างที่ตัดเป็นชิ้นแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง หลังผ่านการอบแล้วนำตัวอย่างเฮมพ์มาชั่ง 1 กรัม เทลงในบีกเกอร์แบบทนความร้อนแล้วนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง เพื่อให้กลายเป็นเถ้าขาว จากนั้นเติมสารละลายผสมระหว่างกรดไนตริกกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อัตราส่วน 2 ต่อ 1 ลงในเถ้า ผสมและทำให้แห้งด้วยความร้อนต่ำ กวนเป็นครั้งคราวจนได้สารผสมแห้ง ๆ จากนั้นละลายสารผสมที่ได้ด้วยกรดไนตริก 1 โมลาร์ จำนวน 3 มิลลิลิตร นำมาปั่นกวนแยกกากแล้วกรองส่วนที่ใส ปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณการสะสมแคดเมียมทั้งหมดด้วย เครื่อง ICP-OES (Ivanov *et al*., 2017)

จากนั้นทำการประเมินความเป็นพิษและความเสี่ยงจากผลิตภัณฑ์ของเฮมพ์ โดยทำการประเมิน 2 แบบ ได้แก่ 1) รูปแบบในแง่ที่แคดเมียมมีพิษก่อให้เกิดโรคอื่นที่ไม่ใช่โรคมะเร็ง (Noncarcinogen) และ 2) รูปแบบที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Carcinogen) ทำการประมวลผลโดยใช้แฟคเตอร์และข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากการอ้างอิงด้วย Exposure Factor Handbook (USEPA, 2017)

8. การวิเคราะห์ปริมาณสารเตตราไฮโดรแคนนาบินอล (Tetrahydrocannabinol, THC)

เนื่องจากเฮมพ์ถูกจัดให้เป็นกลุ่มพืชเสพติดชนิดที่ 5 (Chartrungsun, 2018) จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์สารเสพติด THC ซึ่งเฮมพ์ต้องมีปริมาณ THC ไม่เกินร้อยละ 1 ตามที่กฎหมายกำหนด ดังนั้นการวิเคราะห์ในครั้งนี้ได้ทำการทดสอบปริมาณ THC ด้วยชุดตรวจวัดปริมาณทีเอชซีภาคสนาม (THC test kit) ผลิตโดยสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) ร่วมกับศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 1 จังหวัดเชียงใหม่ เป็นวิธีการที่ใช้หลักการแยกสารด้วยวิธี Thin Layer Chromatography และเป็นชุดตรวจวัด THC เบื้องต้น โดยได้ทำการสุ่มตัวอย่างเฮมพ์ในส่วนใบและยอดของลำต้นไม่เกินตำแหน่ง 1 ใน 3 ส่วน ของลำต้นหรือประมาณ 20 เซนติเมตรจากยอดจำนวน 1-3 ยอดต่อต้น ในวันที่ 90 และ 120 วันของการทดลอง มาทำการวิเคราะห์สาร THC

9. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลปริมาณการดูดดึงและสะสมแคดเมียมที่ได้จากการทดลองปลูกเฮมพ์ในดินปนเปื้อน โดยใช้ One Way Anova เพื่อหาความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's New Multiple Rang Test (DMRT) ทั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติดังกล่าวโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติคือ Statistical Package for the Social Science (SPSS) Version 22

ผลการวิจัย

1. สมบัติของดินทดลอง

1.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพและเคมีของดินทดลอง

การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างดินทดลอง จากบริเวณพื้นที่เกษตรกรรม ตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยแบ่งตัวอย่างดินทดลองออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดดินที่ 1 ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม และชุดดินที่ 2 ดินปนเปื้อนแคดเมียม โดยสามารถแสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินทดลองเบื้องต้นได้ดังตารางที่ 2 ผลจากการวิเคราะห์ พบว่า ดินปนเปื้อนแคดเมียมมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทราย (Sandy Loam) มีปริมาณแคดเมียม เท่ากับ 37.68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดินที่กำหนดไว้ให้มีค่าการปนเปื้อนแคดเมียมได้ไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ดินปนเปื้อนแคดเมียมยังมีค่าพีเอช เท่ากับ 7.48 ค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 0.22 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน เท่ากับ 216.23 มิลลิโวลต์ ค่าการแลกเปลี่ยนไอออนบวก เท่ากับ 15.48 เซนติโมลต่อกิโลกรัม มีปริมาณสารอินทรีย์ เท่ากับ 2.83 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณไนโตรเจน 0.1415 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม เท่ากับ 11.90 และ 61.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 2) จึงสามารถสรุปได้ว่า ดินปนเปื้อนแคดเมียมไม่มีค่าพีเอชที่เป็นผลกระทบทางลบต่อการเติบโตของพืช สามารถนำดินมาใช้ทดลองปลูกพืชได้ สำหรับค่าการนำไฟฟ้าของดินมีค่า เท่ากับ 0.22 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร แสดงให้เห็นได้ว่า ดินไม่มีความเค็มที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพืช โดยค่ามาตรฐานระดับความเค็มของดินที่เป็นอุปสรรคต่อการเติบโตของพืชนั้นต้องมีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า 4 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (Beck *et al*., 2000)

1.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินภายหลังทำการทดลอง

ผลการศึกษาค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของตัวอย่างดินจากทุกชุดการทดลองภายหลังทำการเก็บตัวอย่างดินที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน (ภาพที่ 1) พบว่า ตั้งแต่เริ่มต้นทำการทดลอง ตัวอย่างดินของทุกชุดการทดลอง (C_1-C_2-T_1-T_2) มีค่าพีเอชในดินลดลงไปจนถึง 60 วัน และหลังจากนั้นเริ่มมีแนวโน้มค่าพีเอชเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดลอง ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชในดินที่ 60 วัน พบว่า ทุกชุดการทดลองมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.03-6.61 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.61±0.09, 6.28±0.10, 6.08±0.06 และ 6.03±0.13 ตามลำดับชุดการทดลอง และเมื่อวิเคราะห์ค่าพีเอชในดินที่ 120 วัน พบว่า ค่าพีเอชในดินอยู่ในช่วง 7.60-8.20 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.89±0.06, 8.20±0.04, 8.04±0.10 และ 7.60±0.29 ตามลำดับชุดการทดลอง (ภาพที่ 1 ก) ทั้งนี้ค่าพีเอชในดินลดลงในช่วงเวลา 0 ถึง 60 วันของการทดลอง อาจเนื่องจากสภาพภูมิอากาศในช่วงเวลาดังกล่าวมีปริมาณฝนตกชุก ดินจึงมีความชื้นสูงและส่งผลให้ธาตุที่มีไฮโดรเจนเป็นสารประกอบเกิดการละลายน้ำและแตกตัวเป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) จึงทำให้ดินมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น (Wongkrachang & Rattaneetu, 2014) และเมื่อเวลาของการทดลองค่าพีเอชของดินเริ่มมีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเป็นช่วงที่พืชศึกษา หรือเฮมพ์เริ่มมีการเจริญเติบโตเต็มวัยและเริ่มมีการผลิตเส้นใยขึ้น รวมถึงมีการสร้างสารประกอบต่าง ๆ มากขึ้น ดังนั้นเฮมพ์จึงมีความต้องการธาตุอาหารที่สูง และจากการรวมตัวกันของอีดีทีเอกับแคตไอออนของแคดเมียม จึงทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งเป็นสารละลายที่ง่ายต่อการถูกดูดดึงด้วยพืช และทำให้เฮมพ์ดูดดึงแคดเมียมในสารละลายดินได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในสารละลายดินสูงขึ้น (Pojanaporn, 2009) ดังนั้น ค่าพีเอชของดินจึงมีแนวโน้มมากขึ้นตามระยะเวลาการทดลอง

สำหรับค่าการนำฟ้าและค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน พบว่า ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ทุกชุดการทดลองมีค่าการนำไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 1 ข และ ค) ทั้งนี้เนื่องจาก

ค่าการนำไฟฟ้ามีความผกผันกับค่าพีเอช โดยเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการละลายของธาตุบางชนิดลดลง จึงส่งผลให้ดินมีสารละลายลดลงและทำให้ค่าการนำไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันที่ตรวจวัดได้มีปริมาณลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังอาจมีผลจากการที่พืชมีการดูดดึงไอออนบวกที่มีปฏิกิริยาเป็นกรดหรือแคดเมียมไอออนไปเก็บสะสมไว้ในส่วนต่าง ๆ ของพืชด้วย (Salimi *et al.*, 2012: Sampanpanish & Pinpa, 2018)

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพและเคมีของดินทดลอง

พารามิเตอร์ (หน่วย)	ค่าที่วิเคราะห์ได้	
	ดินไม่ปนเปื้อนแคดเมียม	ดินปนเปื้อนแคดเมียม
เนื้อดิน	ดินร่วน	ดินร่วนปนทราย
พีเอช	7.82	7.48
การนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต์ต่อเซ็นติเมตร)	0.17	0.22
ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)	153.27	216.23
การแลกเปลี่ยนไอออนบวก (เซนติโมลต่อกิโลกรัม)	14.27	15.48
ปริมาณสารอินทรีย์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1.29	2.83
ไนโตรเจน (เปอร์เซ็นต์)	0.0645	0.1415
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	17.20	11.90
โพแทสเซียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	44.70	61.60
แคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	0.56	37.68

2. ผลของแคดเมียมต่อมวลชีวภาพและอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของเฮมพ์

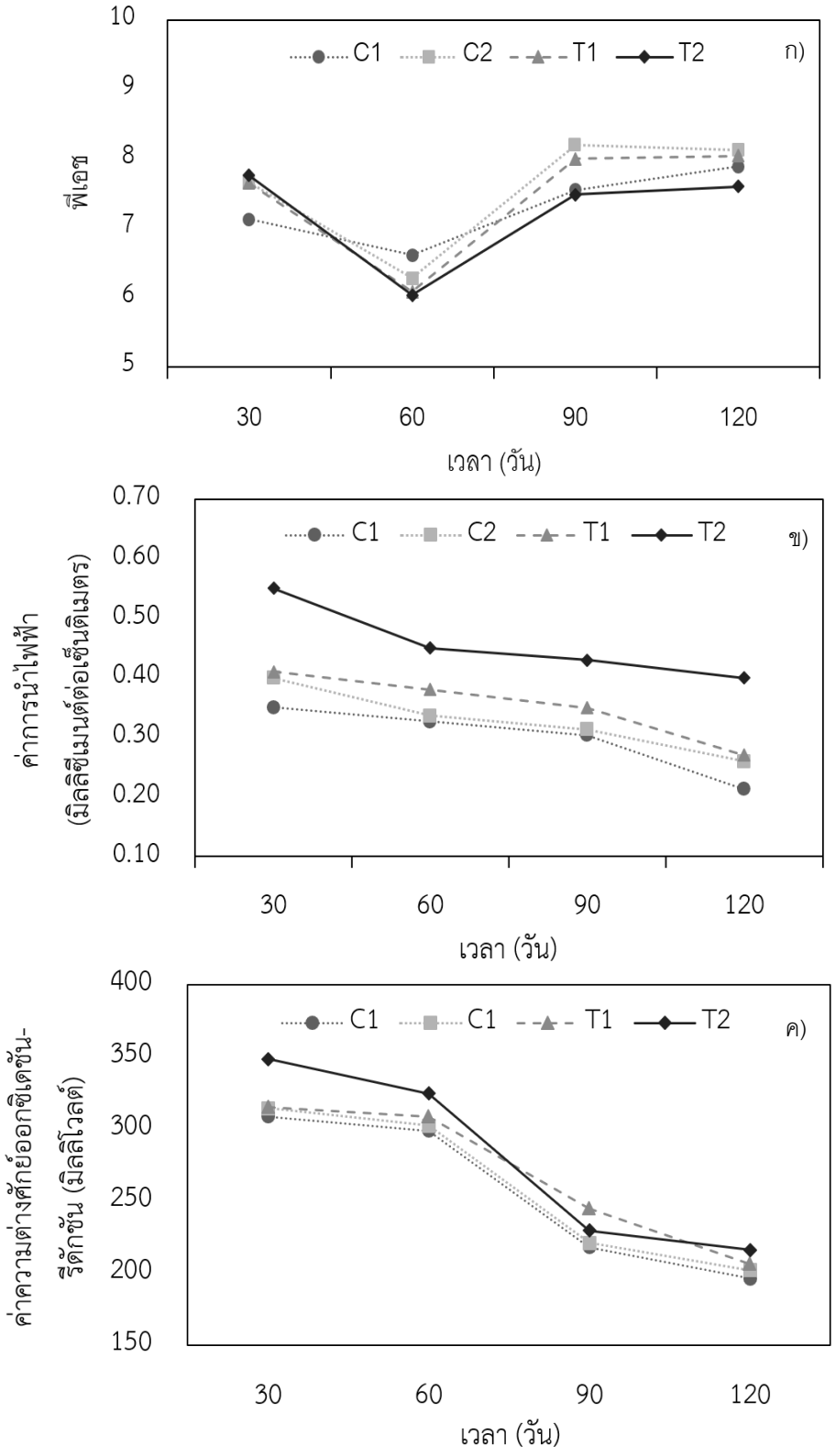
การศึกษาการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งของเฮมพ์ โดยการเก็บข้อมูลตัวอย่างพืชที่ระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 วัน และทำการชั่งน้ำหนักเฮมพ์หลังอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าน้ำหนักแห้งของมวลชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการทดลองที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่า ชุดการทดลองที่มีการเติมอีดีทีเอ (T_1 และ T_2) มีมวลชีวภาพน้อยกว่าชุดควบคุม (C_1 และ C_2) และระดับความเข้มข้นของอีดีทีเอที่สูงขึ้น ส่งผลให้เฮมพ์มีมวลชีวภาพลดลง โดยมวลชีวภาพที่ระยะเวลา 120 วันในชุดการทดลองดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมร่วมกับการเติมอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:1 และ 1:2 พบว่า มีค่าเท่ากับ 20.80 และ 15.59 กรัม ตามลำดับ สำหรับมวลชีวภาพของชุดควบคุม C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากับ 28.79 และ 25.43 กรัม ตามลำดับ สาเหตุที่ทำให้ชุดการทดลองที่มีการเติมอีดีทีเอนั้น มีมวลชีวภาพน้อยกว่าชุดควบคุม อาจเนื่องมาจาก อีดีทีเอมีประสิทธิภาพในการชะละลายโลหะหนักในดินให้คงอยู่ในรูปของสารละลายง่ายต่อการดูดดึงไปใช้ประโยชน์ด้วยพืช (Chen *et al.*, 2004) จึงทำให้พืชมีการสะสมแคดเมียมสูง ส่งผลให้เฮมพ์ชะงักการเจริญเติบโตได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hadi *et al.*, 2014 ที่ทำการศึกษาผลของยูเรียและอีดีทีเอต่อการเจริญเติบโตของเฮมพ์ที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วและแคดเมียม ผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้เฮมพ์ดูดดึงตะกั่วและแคดเมียมสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม แต่ในทางตรงกันข้าม เฮมพ์มีการเจริญเติบโตด้านมวลชีวภาพน้อยลง จึงทำให้เฮมพ์มีการสะสมตะกั่วและแคดเมียมได้น้อยกว่าชุดการทดลองที่เติมยูเรียร่วมกับอีดีทีเอ ทั้งนี้เนื่องจากยูเรียสามารถช่วยเพิ่มการเติบโตด้านมวลชีวภาพของเฮมพ์ให้สูงขึ้น จึงทำให้เฮมพ์มี

ความแข็งแรงกว่าชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอเพียงอย่างเดียว จึงสามารถสรุปได้ว่า การเติมอีดีทีเอเพียงอย่างเดียวสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมโลหะหนักในพืชได้มากขึ้น แต่ส่งผลให้การเจริญเติบโตด้านมวลชีวภาพของพืชลดลง

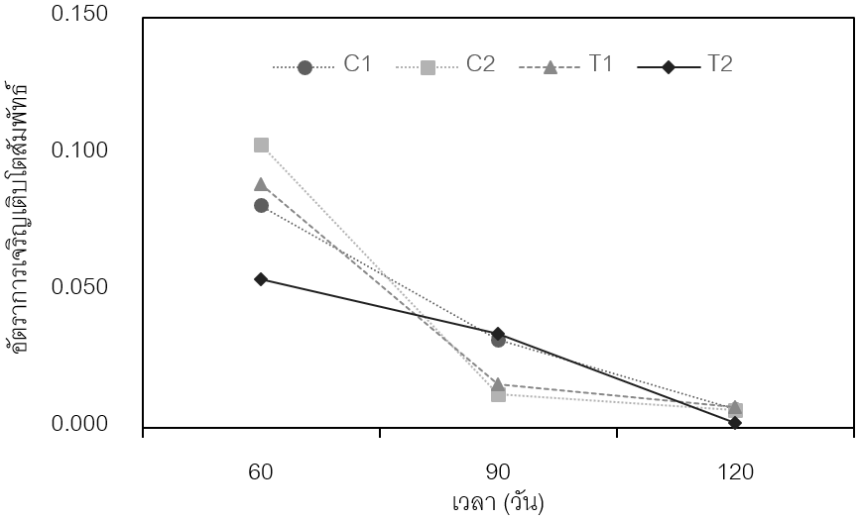
สำหรับการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของเฮมพ์ พบว่า เฮมพ์มีค่าการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดลงเมื่อมีระยะเวลาการทดลองมากขึ้น โดยชุดการทดลอง T_2 มีอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดลงมากที่สุด โดยพบว่า ที่ระยะเวลา 120 วัน มีค่าการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ เท่ากับ 0.004 (ภาพที่ 2)

3. ผลของอีดีทีเอต่อการสะสมแคดเมียมในดินทดลอง

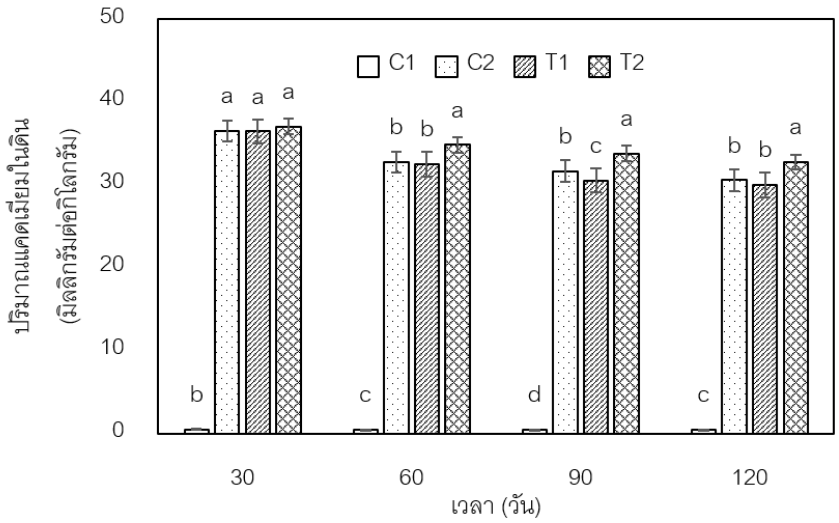
การศึกษาปริมาณแคดเมียมปนเปื้อนในตัวอย่างดินทดลองของวันที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่คงเหลืออยู่ในดินของทุกชุดการทดลองนั้น มีแนวโน้มปริมาณแคดเมียมในดินลดลงตลอดระยะเวลาการทดลอง (ภาพที่ 3) แสดงให้เห็นว่า อีดีทีเอมีประสิทธิภาพในการเพิ่มการเคลื่อนย้ายแคดเมียมเข้าไปสะสมภายในเนื้อเยื่อพืช ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในดินลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Citterio *et al.,* 2003 ที่ทำการศึกษาความสามารถของเฮมพ์ในการบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนัก ผลการทดลอง พบว่า โลหะหนักในดินลดลงตลอดระยะเวลาทำการทดลอง และเฮมพ์มีการสะสมแคดเมียมในรากเป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับการทดลองของ Abdel-Salam, 2012 ที่ทดสอบประสิทธิภาพของอีดีทีเอในการเพิ่มปริมาณการสะสมแคดเมียมในพืช ผลการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่เติมอีดีทีเอกับชุดควบคุม พืชที่ปลูกในดินที่มีการเติมอีดีทีเอนั้น มีการสะสมแคดเมียมสูงกว่าพืชที่เติบโตในชุดควบคุม และดินทดลองในชุดที่เติมอีดีทีเอยังมีปริมาณแคดเมียมในดินลดลงมากกว่าชุดควบคุม และจากการทดลองในครั้งนี้ยังพบว่า ชุดดินปนเปื้อนแคดเมียมร่วมกับการเติมอีดีทีเอในอัตราส่วนสมมูล (T_1) เป็นชุดการทดลองที่มีปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินลดลงสูงที่สุด รองลงมาคือ C_2>T_2 ทั้งนี้เนื่องจากอีดีทีเอมีประสิทธิภาพในการจับโลหะหนักทำให้โลหะหนักคงอยู่ในรูปของสารละลาย ซึ่งง่ายต่อการดูดดึงด้วยพืช (Karthika *et al*., 2016) แต่หากมีการเติมอีดีทีเอที่มีระดับความเข้มข้นสูงเกินไปจะส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตลดลง และทำให้พืชมีการดูดดึงโลหะหนักลดลงด้วยเช่นกัน (Farid *et al*., 2013) ทั้งนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องต่อการดูดดึงสะสมโลหะหนักในพืช ได้แก่ ชนิดของพืช ความทนทานต่อโลหะหนักของพืช ระดับความเข้มข้นของโลหะหนักในดิน ความสามารถในการละลายของโลหะหนัก และค่าพีเอชในดิน



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของตัวอย่างดินจากทุกชุดการทดลอง ก) ค่าพีเอช ข) ค่าการนำไฟฟ้า และ ค) ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน



ภาพที่ 2 อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของเฮมพ์



ภาพที่ 3 ปริมาณการสะสมแคดเมียมในดินทดลอง

หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95ปอร์เซ็นต์ ระหว่างระยะเวลากับชุดการทดลองที่แตกต่างกัน และค่ามาตรฐานแคดเมียมในดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัย และการเกษตรกรรมมีค่าเท่ากับ 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

4. ผลของอีดีทีเอต่อปริมาณการดูดดึงและสะสมแคดเมียมในเฮมพ์

การศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในพืชส่วนเหนือดิน (เปลือก แกน และใบ) และส่วนใต้ดิน (ราก) ของเฮมพ์ (ภาพที่ 4) พบว่า ทุกส่วนของเฮมพ์มีการสะสมโลหะหนัก หากในแต่ละส่วนของเฮมพ์มีการสะสมโลหะหนักที่แตกต่างกัน โดยจากการทดลอง พบว่า รากของเฮมพ์เป็นส่วนที่มีการสะสมแคดเมียมสูงที่สุด (ภาพที่ 4 ก) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลอง

ของ Citterio *et al*., 2003 ที่ทำการศึกษาความสามารถของเฮมพ์ในการดูดดึงโลหะหนัก จากการทดลองพบว่า เฮมพ์มีการสะสมแคดเมียมในรากสูงสุด และมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกดูดดึงไปไว้เนื้อเยื่อพืชส่วนเหนือดิน เช่นเดียวกับการศึกษาของ Hadi *et al*., 2014 ที่ทดลองปลูกเฮมพ์ในดินปนเปื้อนโลหะหนัก แล้วพบว่า รากเป็นส่วนที่มีการสะสมโลหะหนักสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากรากเป็นส่วนที่มีการสัมผัสกับดินปนเปื้อนโลหะหนักโดยตรง จึงทำให้มีการดูดซับสารปนเปื้อนได้มากกว่าส่วนอื่น ๆ ซึ่งการทดลองในครั้งนี้ พบว่า ชุดการทดลอง T_1 เป็นชุดที่เฮมพ์มีการดูดดึงและสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุด ซึ่งมีปริมาณแคดเมียมในราก เท่ากับ 103.63, 104.45, 114.11 และ 120.74 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (ภาพที่ 4 ก) ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง ในขณะที่มีการดูดดึงและสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้น เท่ากับ 0.60, 1.43, 1.58 และ 1.65 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (ภาพที่ 4 ข) ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง และมีการดูดดึงและสะสมแคดเมียมในส่วนใบ เท่ากับ 0.57, 1.24, 1.59 และ 1.86 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (ภาพที่ 4 ค) ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า เฮมพ์มีการสะสมแคดเมียมได้ในปริมาณที่สูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมหรือมากกว่า 0.01 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง (Chen *et al*., 2004) จึงสามารถจัดให้เฮมพ์เป็นพืชไฮเปอร์แอกคิวมิวเลเตอร์ (Hyperaccumulator Plant) หรือเป็นพืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนักในปริมาณสูงเป็นพิเศษ โดยใช้กลไกการสะสมสารมลพิษในพืช (Phytoaccumulation) หรือการสกัดสารมลพิษด้วยพืช (Phytoextraction) ในการลำเลียงโลหะหนักจากดินผ่านรากขึ้นสู่เนื้อเยื่อต่าง ๆ ของพืชได้ในปริมาณสูง

5. การประเมินความเป็นพิษและความเสี่ยงจากผลิตภัณฑ์

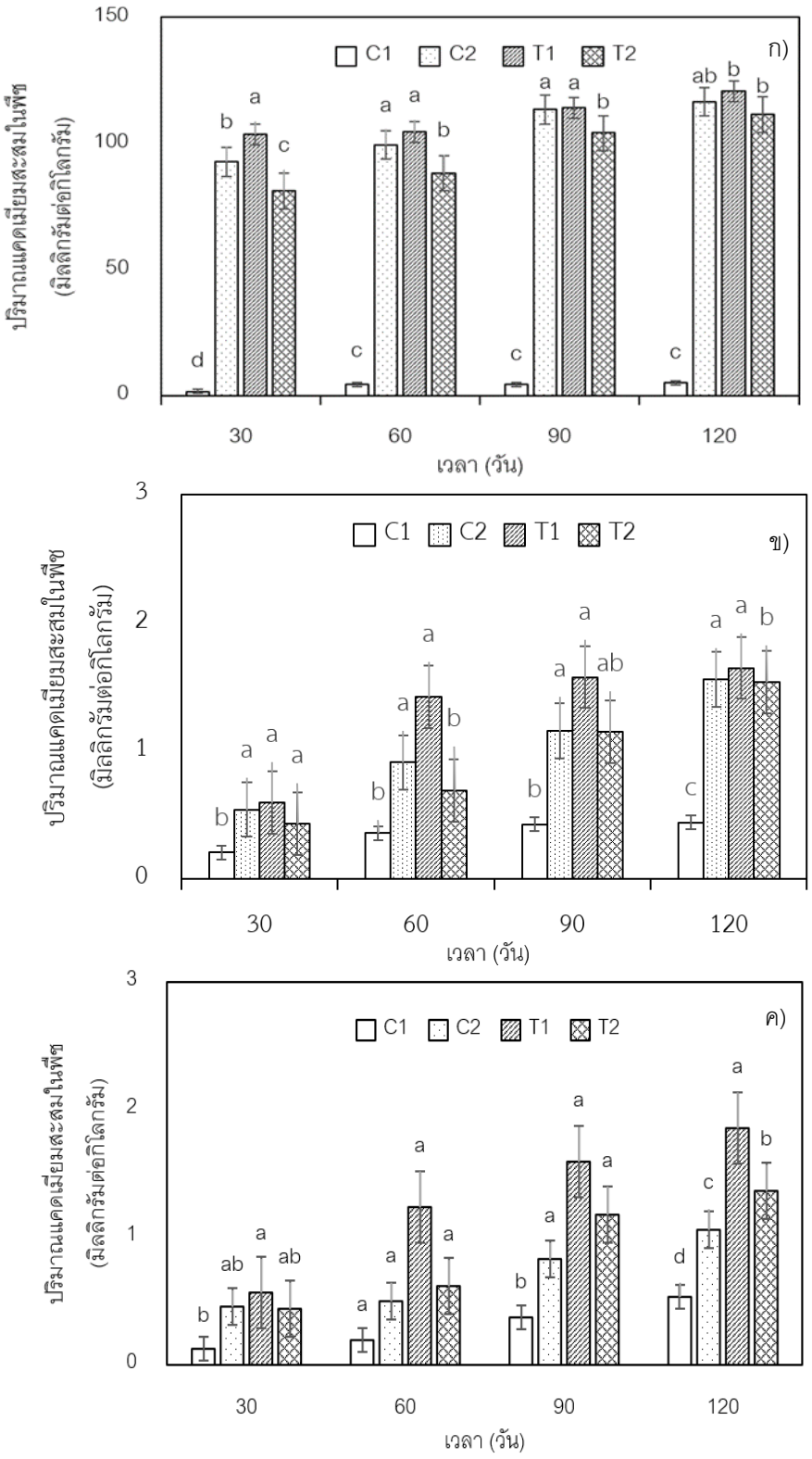
เมื่อทำการพิจารณาการเจริญเติบโตของเฮมพ์จากอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ พบว่า ทุกชุดการทดลองเฮมพ์มีการเจริญเติบโตเต็มที่ตั้งแต่ 60-90 วัน ดังนั้น จึงได้ทำการเก็บตัวอย่างเฮมพ์มาทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นพิษของพืชในวันที่ 90 และ 120 วัน ของการทดลอง โดยเก็บตัวอย่างบริเวณส่วนเปลือก (เส้นใย) และลำต้น (แกน) มาใช้ในการประเมินความเสี่ยง เนื่องจากบริเวณส่วนดังกล่าว เป็นส่วนที่จะนำมาพัฒนามาเป็นผลิตภัณฑ์ชุมชน ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 3 พบว่า ทุกชุดการทดลองแคดเมียมเข้าไปสะสมภายในบริเวณส่วนเปลือก (เส้นใย) มากกว่าส่วนลำต้น (แกน) และเมื่อระยะเวลาการทดลองมากขึ้น พืชมีการสะสมแคดเมียมในส่วนเปลือก (เส้นใย) และลำต้น (แกน) เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยชุดการทดลองที่มีแคดเมียมสะสมบริเวณส่วนเปลือก (เส้นใย) และลำต้น (แกน) ในปริมาณสูงสุดคือ ชุดการทดลอง T_1 รองลงมาคือ C_2>T_2>C_1 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในข้อ 3. และ 4. ที่แสดงให้เห็นว่า ชุดการทดลอง T_1 เป็นชุดการทดลองที่ลดปริมาณแคดเมียมสะสมในดินสูงสุด และเฮมพ์มีการสะสมแคดเมียมภายในส่วนต่าง ๆ ของพืชได้มากที่สุด เป็นต้น

สำหรับการออกแบบและพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เฮมพ์ เพื่อให้ชุมชนนำไปใช้ประโยชน์นั้น พบว่า มีการสางเส้นใย ตัดบดเส้นใย ซึ่งอาจทำให้เกิดอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กฟุ้งกระจายได้ในอากาศ และติดตามเสื้อผ้าและร่างกายของผู้ผลิต ดังนั้นในระหว่างกระบวนการผลิต ควรมีการสวมหน้ากากอนามัยที่สามารถกรองอนุภาคขนาดเล็ก จะสามารถช่วยป้องกันความเป็นพิษจากการสูดดมได้ การศึกษาครั้งนี้ จึงได้ทำการประเมินความเป็นพิษโดยวิเคราะห์การได้รับจากการกินเป็นหลัก และทำการประเมิน 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) รูปแบบในแง่ที่แคดเมียมมีพิษก่อให้เกิดโรคอื่นที่ไม่ใช่โรคมะเร็ง (Noncarcinogen) (ตารางที่ 4) และ 2) รูปแบบที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Carcinogen) จากการประเมินความเป็นพิษผ่านกานกินเป็นวิถีหลัก ได้ทำการวิเคราะห์ในรูปที่เป็นกรณีร้ายแรง (Worse Case) และขนาดที่อาจได้รับขั้นต่ำเป็นกรณีพื้นฐาน โดยใช้น้ำหนักเฉลี่ยทั้งเพศชายและเพศหญิง อายุ 16 ปี ขึ้นไป มีน้ำหนักเฉลี่ย 68.66 และ 57.48 กิโลกรัม

ตามลำดับ (http://www.sizethailand.org/sizechart.html) ซึ่งมีค่าแนวโน้มของการได้รับดินและฝุ่น (Soil and Dust) ผ่านการกิน 4-50 มิลลิกรัมต่อวัน (ขั้นต่ำสุด-ขั้นสูงสุด) มีค่าเฉลี่ย 30 มิลลิกรัมต่อวัน (USEPA, 2017)

ตารางที่ 3 ปริมาณแคดเมียมในส่วนเปลือก (เส้นใย) และแกนของเฮมพ์ในการทำผลิตภัณฑ์

ชุดการทดลอง	แคดเมียม (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง)			
	ส่วนเปลือก (เส้นใย)		ส่วนลำต้น (แกน)	
	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



ภาพที่ 4 ปริมาณการดูดดึงและสะสมแคดเมียมในเฮมพ์ ก) ปริมาณการดูดดึงและสะสมแคดเมียมในส่วนราก ข) ปริมาณการดูดดึงและสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้น และ ค) ปริมาณการดูดดึงและสะสมแคดเมียมในส่วนใบ

สำหรับการออกแบบและพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เฮมพ์ เพื่อให้ชุมชนนำไปใช้ประโยชน์นั้น พบว่า มีการสางเส้นใย ตัด บดเส้นใย ซึ่งอาจทำให้เกิดอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กฟุ้งกระจายได้ในอากาศ และติดตามเสื้อผ้าและร่างกายของผู้ผลิต ดังนั้นในระหว่างกระบวนการผลิต ควรมีการสวมหน้ากากอนามัยที่สามารถกรองอนุภาคขนาดเล็ก จะสามารถช่วยป้องกันความเป็นพิษจากการสูดดมได้ การศึกษาครั้งนี้ จึงได้ทำการประเมินความเป็นพิษโดยวิเคราะห์การได้รับจากการกินเป็นหลัก และทำการประเมิน 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) รูปแบบในแง่ที่แคดเมียมมีพิษก่อให้เกิดโรคอื่นที่ไม่ใช่โรคมะเร็ง (Noncarcinogen) (ตารางที่ 4) และ 2) รูปแบบที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Carcinogen) จากการประเมินความเป็นพิษผ่านกานกินเป็นวิถีหลัก ได้ทำการวิเคราะห์ในรูปที่เป็นกรณีร้ายแรง (Worse Case) และขนาดที่อาจได้รับขั้นต่ำเป็นกรณีพื้นฐาน โดยใช้น้ำหนักเฉลี่ยทั้งเพศชายและเพศหญิง อายุ 16 ปี ขึ้นไป มีน้ำหนักเฉลี่ย 68.66 และ 57.48 กิโลกรัม ตามลำดับ (http://www.sizethailand.org/sizechart.html) ซึ่งมีค่าแนวโน้มของการได้รับดินและฝุ่น (Soil and Dust) ผ่านการกิน 4-50 มิลลิกรัมต่อวัน (ขั้นต่ำสุด-ขั้นสูงสุด) มีค่าเฉลี่ย 30 มิลลิกรัมต่อวัน (USEPA, 2017)

การจำแนกความเสี่ยงจากลักษณะของสารที่ไม่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Noncarcinogen) โดยคิดผลรวมจากดัชนีย่อยความเป็นอันตรายของสารพิษ (Hazard Index, HI) (ตารางที่ 4) พบว่า ค่า HI มีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งแสดงว่า ปริมาณสารที่ได้รับเข้าไปยังเป็นความเสี่ยงที่ยอมรับได้ถือว่ายังปลอดภัย ทั้งนี้เนื่องจาก HI มีค่าต่ำมาก สำหรับการประเมินความเป็นพิษในรูปที่แคดเมียมเป็นสารพิษก่อมะเร็ง (Carcinogen) โดยหาค่าความเสี่ยงในรูปค่าความเสี่ยงที่รับได้ (Acceptable Risk; R) พบว่าส่วนเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์จากทุกชุดการทดลอง มีค่า R น้อยกว่า $1*10^{-6}$ จึงถือว่าไม่มีความเสี่ยงในการเป็นมะเร็งเพิ่มขึ้น และจากการทดลองยังแสดงให้เห็นได้ว่า กรณีที่ปลูกเฮมพ์บนดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมธรรมชาติ (C_2) พบว่า ผลิตภัณฑ์ยังมีความเสี่ยงในการก่อให้เกิดโรคน้อยมาก และยังถือได้ว่า อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภค

6. ปริมาณสารเสพติด THC ของเฮมพ์ ภายหลังทำการเพาะปลูกในดินปนเปื้อน

จากผลการตรวจวัดสาร THC จากเฮมพ์ในทุกชุดการทดลองที่ระยะเวลาการทดลอง 90 วัน พบว่า เมื่อเทียบขนาดและความเข้มสีของจุดบนแผ่นทดสอบกับแผ่นเทียบมาตรฐาน THC ที่ให้มานั้น สารเสพติด THC ในเฮมพ์ไม่เกินจุด Cut off ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่า ปริมาณสารเสพติด THC มีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ โดยจุด Cut off อยู่ที่ 0.8 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) เช่นเดียวกับผลการทดสอบที่ระยะเวลาการทดลอง 120 วัน พบว่า สารเสพติด THC ของทุกชุดการทดลอง มีค่าไม่เกินจุด Cut off เช่นกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณสารเสพติด THC ในทุกชุดการทดลองมีค่าต่ำ และไม่มีแนวโน้มของค่าที่จะเกินมาตรฐานสารเสพติด THC ที่กฎหมายกำหนด

ตารางที่ 4 ดัชนีความเป็นพิษ (HI) ที่ก่อให้เกิดโรคอื่นที่ไม่ใช่โรคมะเร็ง (Noncarcinogen)

ปริมาณฝุ่นที่ได้รับ (มิลลิกรัมต่อวัน)		ดัชนีความเป็นพิษก่อให้เกิดโรคอื่นที่ไม่ใช่มะเร็ง (Noncarcinogen)			
ส่วนเปลือก (เส้นใย) (90 วัน)		HI-Male-C_1	HI-Male-C_2	HI-Male-T_1	HI-Male-T_2
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_1	HI-Female-C_2	HI-Female-T_1	HI-Female-T_2
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_1	HI-Male-C_2	HI-Male-T_1	HI-Male-T_2
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_1	HI-Female-C_2	HI-Female-T_1	HI-Female-T_2
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
ส่วนลำต้น (แกน) (90 วัน)		HI-Male-C_1	HI-Male-C_2	HI-Male-T_1	HI-Male-T_2
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_1	HI-Female-C_2	HI-Female-T_1	HI-Female-T_2
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_1	HI-Male-C_2	HI-Male-T_1	HI-Male-T_2
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_1	HI-Female-C_2	HI-Female-T_1	HI-Female-T_2
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

วิจารณ์ผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ พบว่า เฮมพ์เป็นพืชที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียมได้ดี และหากมีการเติมสารคีเลต เช่น อีดีทีเอในอัตราส่วนที่เหมาะสม ก็จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดดึงและสะสมแคดเมียมในเฮมพ์ให้สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารคีเลตจะรวมตัวกับโลหะหนักเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Chelation และผลที่ได้จากปฏิกิริยานี้เรียกว่า สารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) หรือสารประกอบโคออร์ดิเนชัน (Coordination Compound) ซึ่งเป็นสารที่มีผลต่อการดูดดึงของพืช (Speight, 2017) อีกทั้งสารคีเลตยังป้องกันไม่ให้เกิดการตกตะกอนของประจุบวกบางชนิดรวมถึงจุลธาตุ เช่น แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และ ตะกั่ว เป็นต้น โดยสารคีเลตจะเข้าล้อมรอบประจุบวกที่เป็นโลหะ (Metallic Cation) และไม่ยอมให้สารอื่นเข้ามาสร้างพันธะกับประจุบวกเหล่านี้ จึงทำให้ประจุบวกที่มีสารคีเลตล้อมรอบอยู่ในสภาพสารละลายได้นาน ทำให้พืชสามารถดูดดึงนำไปใช้ได้ง่ายขึ้น (Razuvaev *et al.,* 1971) ซึ่งจากผลการทดลองในครั้งนี้พบว่า การเติมอีดีทีเอในอัตราส่วน 1:1 โมล (T_1) เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาประยุกต์ใช้บำบัดดินปนเปื้อนแคดเมียม และยังพบว่า เฮมพ์มีการสะสมแคดเมียมสูงสุดบริเวณราก โดยชุดการทดลอง T_1 เป็นชุดที่เฮมพ์มีการดูดดึงและสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุด ซึ่งมีปริมาณแคดเมียมในราก เท่ากับ 103.63, 104.45, 114.11 และ 120.74 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับระยะเวลาของการทดลอง แสดงให้เห็นว่า เฮมพ์เป็นพืชกลุ่มไฮเปอร์แอกคิวมิวเลเตอร์ (Hyperaccumulator Plant) ได้ เนื่องจากมีการสะสมแคดเมียมได้ในปริมาณที่สูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมหรือมากกว่า 0.01 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง (Chen *et al*., 2004) นอกจากนี้เฮมพ์ยังมีการสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้น (แกน) และ ส่วนเปลือก (เส้นใย) ต่ำ จากการนำตัวอย่างส่วนลำต้น (แกน) และ ส่วนเปลือก (เส้นใย) มาประเมินความเป็นพิษด้วยการวิเคราะห์และทำการประเมิน 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) รูปแบบในแง่ที่แคดเมียมมีพิษก่อให้เกิดโรคอื่นที่ไม่ใช่โรคมะเร็ง (Noncarcinogen) และ 2) รูปแบบที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (Carcinogen) พบว่า เฮมพ์ที่ผ่านการปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียมไม่ก่อให้เกิดความเสี่ยงทั้งในรูปที่ก่อให้เกิดโรคอื่นที่ไม่ใช่มะเร็ง และในรูปที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง ดังนั้น สามารถกล่าวได้ว่า หากนำเฮมพ์ไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสร้างอาชีพและรายได้ให้กับชุมชนแล้วนั้น ก็สามารถยืนยันได้ว่า ผลิตภัณฑ์นั้นจะมีความเสี่ยงในการก่อให้เกิดโรคน้อยมาก และยังถือได้ว่า อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภคด้วย

สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า อีดีทีเอเป็นสารคีเลตที่มีความเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการบำบัดดินปนเปื้อนด้วยพืช โดยพบว่า พืชศึกษา หรือเฮมพ์ มีความสามารถในการดูดดึงและสะสมแคดเมียมได้สูงขึ้นเมื่อมีการเติมอีดีทีเอในอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งสำหรับการทดลองในครั้งนี้ การเติมอีดีทีเอในอัตราส่วนที่สมมูลกับปริมาณแคดเมียมในดิน (T_1) เป็นสัดส่วนที่มีความเหมาะสมที่สุด และเฮมพ์ที่ปลูกในชุดดินทดลองดังกล่าว สามารถสะสมแคดเมียมได้สูงที่สุด โดยเฉพาะส่วนใต้ดิน (ราก) อีกทั้งเนื้อเยื่อในส่วนเปลือก (เส้นใย) ของเฮมพ์ ยังมีการดูดดึงแคดเมียมในปริมาณต่ำ จึงสามารถนำมาใช้ปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนจริงได้ เพื่อนำผลผลิต (เส้นใย) ที่ได้จากเฮมพ์มาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เพื่อสร้างเสริมรายได้ให้กับชุมชนอีกช่องทางหนึ่ง นอกจากนี้ จากผลการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่จริงได้ ทั้งนี้เพื่อช่วยลดปัญหาการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม และลดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของชุมชนได้อย่างเป็นรูปธรรม

ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาในครั้งนี้จึงมีข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป คือ ควรมีการเพิ่มชุดการทดลองที่มีการใช้ระดับความเข้มข้นของสารคีเลตผสมที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้นจากการทดลองในครั้งนี้ และควรทำการทดลองการใช้ปุ๋ย และชนิดของพืชศึกษาที่หลากหลายชนิดร่วมกับการใช้สารคีเลต เพื่อศึกษาแนวโน้มของการบำบัดฟื้นฟูดินปนเปื้อนที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพในการเพิ่มการดูดดึงและสะสมโลหะหนักในพืชศึกษา

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนหน่วยปฏิบัติการวิจัย (Research Unit) การจัดการเหมืองสีเขียว กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณ สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อำนวยความสะดวกในด้านสถานที่ พร้อมทั้งสนับสนุนด้านเครื่องมือทดลองทางวิทยาศาสตร์ อันเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Abdel-Salam, M.A. (2012). Chemical and phytoremediation of clayey and sandy textured soils polluted with cadmium. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, *12*(6), 689-693.

Beck, R., Kalra, Y., Vaughan, B. & Wolf, A.M. (2000). *Soil Analysis–Handbook of Reference Methods*. (1). New York: CRC Press LLC.

Chartrungsun, P. (2018). Hemp control measures. *ONCB Journal, 34*(2), 47-52. (in Thai)

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.

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. (2015). *General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed (CODEX STAN 193-1995, last amended in 2015)*. Retrieved July 20, 2020, from file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/CXS_193e_2015.pdf

Farid M., Ali S., Shakoor M., Bharwana S., Rizvi H., Ehsan S., Tauqeer H., Iftikhar U. & Hannan F. (2013). EDTA Assisted Phytoremediation 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.

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.

Highland Research and Development Institute (Public Organization). (2016). *Guide to creating a hemp for the production of fibers under the control system.* Chiang Mai: Wanida Karnpim limited partnership. (in Thai)

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), 488-493.

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.

Notification of The National Environmental Board No.25. (2004). The Soil Quality Standard. *Handbook of Business Operation in Thailand's Industrial Estate Version 2, 25*, 170-181. (in Thai)

Pojanaporn, T. (2009). Effect of EDTA and EDDs on phytoextraction of Chromium and Lead in contaminated soil using *Ananas comosus* (L.) Merr. Master's thesis, Environmental Science, Chulalongkorn University. (in Thai)

Razuvaev, G.A., Domrachev, G.A., Suvorova, O.N. and Abakumova, L.G. (1971). Synthesis and stability of mixed sandwich chelate transition metal complexes. *Journal of Organometallic Chemistry*, *32*(1), 113-120.

Salimi, M., Amin, M., Ebrahimi, A., Ghazifard, A. & Najafi, P. (2012). Influence of electrical conductivity on the phytoremediation of contaminated soils to Cd 2^{+} and Zn 2^{+}. *International Journal of Environmental Health Engineering, 1*(1), 57- 62.

Sampanpanis, P. (2015). Phytoremediation. Bangkok: Chulalongkorn University Press. (in Thai)

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. (in Thai)

Speight, J.G. (2017). Removal of inorganic compounds from the environment. *Environmental inorganic chemistry for engineers*. (pp. 427-478). Oxford: Butterworth-Heinemann.

USEPA. (1996). *Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices (method 3052)*. Retrieved July 20, 2020, from https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3052.pdf

USEPA. (2007). *Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils (Method 3051A)*. Retrieved July 20, 2020, from http://www.caslab.com/EPA-Methods/PDF/EPA-Method-3051A.pdf

USEPA. (2017). *Update for Chapter 5 of the Exposure Factors Handbook Soil and Dust Ingestion.* Retrieved July 20, 2020, from http://www.ctkydbxxw.com/?sites/production/files/2018-01/documents/efh-chapter05_2017.pdf

Wongkrachang, S. & Rattaneetu B. (2014). Acid Soil Management by Using the Lime and Organic Matter. *Princess of Naradhiwas University journal, 6*(1), 103-112. (in Thai)