

Received: April 19, 2022; Revised: July 20, 2022; Accepted: August 6, 2022

การศึกษาการเจริญเติบโต การดูดซับ และการสะสมโลหะหนักของทานตะวัน
(*Helianthus annuus* L.) ที่ปลูกด้วยสารละลายที่มีแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน
The studied of growth, absorption and accumulation of heavy metals by
sunflower (*Helianthus annuus* L.) grown on Cd-Zn co-contaminated solution

ปิยาภรณ์ วรานุสันติกุล^{1*} เจษฎา แพนาค² และโชติวุฒิ เก้ายอดสิงห์²
Piyaporn Waranusantikul^{1*}, Chetsada Phaenark² and Chotivut Kaoyodsing²

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต จังหวัดกรุงเทพมหานคร

²สำนักวิชาสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตกาญจนบุรี จังหวัดกาญจนบุรี

*Corresponding Author E-mail Address : piyapornwara@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเจริญเติบโต และการสะสมโลหะหนักของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายที่มีแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน โดยปลูกทานตะวันด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมหรือสังกะสีที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลกระทบของโลหะหนักต่อการเจริญเติบโตและเลือกระดับความเข้มข้นโลหะหนักที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการเติบโตไปทดลองต่อไป ทานตะวันเติบโตได้ดีเมื่อปลูกด้วยสารละลายที่มีแคดเมียมระดับความเข้มข้นไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และสังกะสีระดับความเข้มข้นไม่เกิน 1.25 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นทำการทดลองการปลูกทานตะวันในสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0, 0.1, 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมจะเติมสังกะสีร่วมด้วยที่ระดับความเข้มข้น 0, 0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 15 วัน จากนั้นนำพืชไปวิเคราะห์การเจริญเติบโตและปริมาณโลหะหนัก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสังกะสีซึ่งเป็นธาตุอาหารรองจะยับยั้งการเติบโตของพืชและก่อให้เกิดความเป็นพิษเมื่อพืชได้รับในปริมาณที่สูงเกินไป สังกะสีในปริมาณที่เหมาะสมสามารถส่งเสริมการเติบโตของพืชในสถานะที่มีแคดเมียมร่วมด้วยได้ การสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณสังกะสีในลำต้นลดลง แคดเมียมอาจส่งผลกระทบต่อดูดซึมสังกะสีและรบกวนกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืชที่สังกะสีมีส่วนเกี่ยวข้อง ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าทานตะวันมีความสามารถในการลำเลียงและสะสมโลหะหนักแคดเมียมในส่วนลำต้นได้มากกว่า 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม มวลแห้ง จัดเป็นพืชที่สามารถดูดซับแคดเมียมได้ในปริมาณสูง

คำสำคัญ: การเจริญเติบโต การดูดซับ แคดเมียม สังกะสี ทานตะวัน

Abstract

This research aimed to investigate the growth and accumulation of heavy metals by sunflower grown on Cd-Zn co-contaminated solution. Sunflowers were grown with mineral solution containing Cd and Zn at different concentrations to study the effects of heavy metals on growth and selected proper concentrations that did not affect growth for further experiments. Sunflowers grew well when planted in a solution with a concentration of Cd not more than 0.5 mg/L and Zn concentration of not more than 1.25 mg/L. After that, sunflower cultivation was carried out in mineral solution containing Cd at concentrations of 0, 0.1, 0.3 and 0.5 mg/L. Each Cd concentration was added with Zn at concentrations of 0, 0.2, 0.6 and 1 mg/L for 15 days. The plants were then analyzed for growth and heavy metal accumulation. This investigation revealed that Zn, a micronutrient, inhibits plant growth and causes toxicity when received in a too high dose. The right amount of Zn can promote plant growth in Cd co-containing conditions. Increased Cd concentration in the stem would result in a decrease in the Zn concentration in the stem. Cd may affect Zn absorption and interfere with the physiological processes of plants which Zn is involved. In this study, sunflower had the ability to transport and accumulate Cd in the stem of more than 100 mg/kg dry weight. It is classified as a Cd hyperaccumulator plant.

Keywords: Growth, Absorption, Cd, Zn, Sunflower

บทนำ

ปัญหามลพิษทางน้ำและทางดิน เป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่กำลังทวีความรุนแรงในประเทศไทย สารมลพิษที่ปนเปื้อนในน้ำและดินนั้น มักเกิดจากการปล่อยน้ำเสียจากแหล่งชุมชน และแหล่งอุตสาหกรรม รวมทั้งยังเกิดจากน้ำฝนที่ชะล้างแร่ธาตุต่าง ๆ จากการใช้ปุ๋ยเคมีทางการเกษตร และการทำอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เป็นต้น ปัญหาสิ่งแวดล้อมดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ทั้งพืชและสัตว์ ซึ่งอาจรุนแรงจนนำไปสู่การสูญพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตได้ (Simmons et al., 2005; La-up et al., 2021)

ปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในแหล่งน้ำและดิน ซึ่งเกิดจากการทำอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ปนเปื้อน ซึ่งบริโภคผลผลิตทางการเกษตรที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ ดังนั้นการจัดการที่ดีเพื่อป้องกันการปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมและบำบัดสิ่งแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีการที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

โดยทั่วไปแล้วโลหะหนักในธรรมชาติจะอยู่ในรูปสารประกอบที่มีความเสถียรสูง แต่การทำเหมืองแร่เพื่อนำโลหะหนักไปใช้ประโยชน์นั้น ส่งผลให้โลหะหนักที่เหลืออยู่ในหินแร่เกิดการรั่วไหล ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมทั้งในแหล่งน้ำและดิน ตัวอย่างเช่น การทำเหมืองแร่สังกะสี ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแร่สังกะสีจะมีโลหะแคดเมียมเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นการทำเหมืองแร่สังกะสีเพื่อนำไปใช้ประโยชน์จึงทำให้เกิดการรั่วไหลของโลหะแคดเมียม ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำและดินเป็นบริเวณกว้างโดยรอบพื้นที่ที่มีการทำเหมือง การปนเปื้อนแคดเมียมในดินส่งผลกระทบต่อชุมชนในพื้นที่ปนเปื้อนเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น การปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่ปลูกข้าว ในบริเวณโดยรอบของพื้นที่เหมือง ที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งทำให้มีการปนเปื้อนแคดเมียม

ในข้าวปริมาณสูง และก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพของคนที่บริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม (Simmons et al., 2005; Phaenark et al., 2009; La-up et al., 2021)

การบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักในดินอาจทำได้ทั้งวิธีทางกายภาพและเคมี เช่น วิธีการแบบรีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse osmosis) การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) การกรอง (Filtration) และการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange) เป็นต้น (Ahalya et al., 2003) แต่การบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนด้วยวิธีทางกายภาพและเคมีนั้น ส่วนใหญ่ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง บำบัดได้ในพื้นที่ขนาดเล็ก ส่งผลเสียต่อคุณภาพดิน และยังทำให้ทัศนียภาพไม่งดงาม การบำบัดการปนเปื้อนโลหะหนักโดยใช้พืช (Phytoremediation) เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับความสะดวกเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีค่าใช้จ่ายต่ำ สามารถประยุกต์ใช้ได้ในพื้นที่ขนาดใหญ่ ไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพของดิน และช่วยลดการชะล้างหรือพังทลายของดิน (Ali et al., 2013) นอกจากนี้ยังทำให้มีทัศนียภาพที่สวยงามด้วย

พืชที่จะนำมาใช้บำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักจะต้องมีความสามารถในการทนต่อโลหะหนักได้ดี สามารถดูดซับและลำเลียงโลหะหนักไปสะสมในส่วนลำต้นได้ในปริมาณที่สูง มีรายงานการศึกษาจำนวนมากเกี่ยวกับพืชที่สามารถนำมาใช้ในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อน (Visootviseth et al., 2002; Chantachon et al., 2004; Rotkittikhun et al., 2006; Rotkittikhun et al., 2007; Chintakovid et al., 2008; Waranusantigul et al., 2008; Phaenark et al., 2009) ซึ่งรวมถึงการศึกษา ก่อนหน้านี้ที่พบว่าทานตะวันเป็นพืชที่สามารถทนทานและสะสมโลหะหนักได้หลายชนิด (Adesodun et al., 2010; Kotschau et al., 2014; Shaheen and Rinklebe, 2015) และมีคุณสมบัติเหมาะสมที่อาจนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาการดูดซับโลหะหนักของต้นทานตะวัน เนื่องจากทานตะวันเป็นพืชที่ได้รับรายงานว่าทนต่อโลหะหนักแคดเมียมและสังกะสีได้ดี สามารถเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่แห้งแล้ง และทนต่อโลหะหนักได้หลายชนิด แต่มีรายงานวิจัยจำนวนน้อยเกี่ยวกับการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของทานตะวันในสภาวะที่มีธาตุร่วมกันสองชนิด

ขอบเขตการวิจัยในครั้งนี้ จะทำการศึกษาความสามารถของทานตะวันในการเจริญเติบโต การดูดซับ และการลำเลียงโลหะหนักแคดเมียมและสังกะสีไปสะสมในส่วนลำต้น โดยการเพาะเลี้ยงพืชด้วยระบบการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponic) ด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน ภายใต้สภาวะควบคุมภายในห้องปฏิบัติการ โดยผลการศึกษาสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำทานตะวันไปประยุกต์ใช้บำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักต่อไป

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. พืชที่ใช้ในการทดลอง

ทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) พันธุ์ Texas lemon โดยใช้เมล็ดพันธุ์ (ตราครุฑแดง) ของบริษัท อีสท์ เวสต์ ซีด จำกัด มีเปอร์เซ็นต์การงอกเท่ากับ 84 หมายเลขสินค้า 198936

2. การเพาะเลี้ยงทานตะวัน เพิ่มจำนวนเพื่อใช้ในการทดลอง

ทานตะวันถูกเพาะเลี้ยงบนวัสดุปลูก เป็นเวลา 30 วัน ในโรงเรือนปรับอากาศ ภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 °C และทำการคัดเลือกพืชที่มีลักษณะคล้ายกันมาทำการทดลอง

3.การปลูกทานตะวันด้วยสารละลายแร่ธาตุ ด้วยระบบปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponic)

3.1 การปลูกทานตะวันในสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมหรือสังกะสี

ต้นทานตะวันที่มีลักษณะคล้ายกันจะถูกนำมาใช้ในการทดลอง พืชจะถูกชั่งน้ำหนัก วัดความยาวลำต้น ความยาวราก และนับจำนวนใบ ก่อนทำการทดลอง จากนั้นพืชจะถูกปลูกในภาชนะแก้วที่เติมสารละลายแร่ธาตุ (10% Hoagland's

solution) นำพืชไปตั้งบนชั้นเหล็กที่ให้แสงสว่างเป็นเวลา 12 ชั่วโมง/วัน และให้ออกซิเจน อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เพื่อปรับสภาพเป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นต้นทานตะวันจะถูกย้ายไปปลูกในภาชนะแก้วที่เติมสารละลายแร่ธาตุ (10% Hoagland's solution) ซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (0, 0.25, 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัม/ลิตร) หรือสังกะสีที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (0, 1.25, 2.5, 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร) รวมทั้งหมด 9 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 5 ซ้ำ (Completely randomized design) นำพืชไปตั้งบนชั้นเหล็กที่ให้แสงสว่างเป็นเวลา 12 ชั่วโมง/วัน และให้ออกซิเจน อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลาทั้งสิ้น 15 วัน โดยเปลี่ยนสารละลายทุก 3 วัน เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พืชจะถูกล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกลั่นให้สะอาดตามลำดับ จากนั้น ชั่งน้ำหนัก วัดความยาวราก ความยาวลำต้น และนับจำนวนใบ หลังการทดลอง เพื่อวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืช

3.2 การปลูกทานตะวันในสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน

ต้นทานตะวันที่มีลักษณะคล้ายกันจะถูกนำมาใช้ในการทดลอง พืชจะถูกชั่งน้ำหนัก วัดความยาวลำต้น ความยาวราก และนับจำนวนใบ ก่อนทำการทดลอง จากนั้นพืชจะถูกปลูกในภาชนะแก้วที่เติมสารละลายแร่ธาตุ (10% Hoagland's solution) นำพืชไปตั้งบนชั้นเหล็กที่ให้แสงสว่าง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง/วัน และให้ออกซิเจน อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เพื่อปรับสภาพเป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นต้นทานตะวันจะถูกย้ายไปปลูกในภาชนะแก้วที่เติมสารละลายแร่ธาตุ (10% Hoagland's solution) ซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (0, 0.1, 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร) ในแต่ละระดับความเข้มข้นแคดเมียมจะเติมสังกะสีร่วมด้วยที่ระดับความเข้มข้น (0, 0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร) รวมทั้งหมด 16 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 5 ซ้ำ (Full factorial design) นำพืชไปตั้งบนชั้นเหล็กที่ให้แสงสว่าง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง/วัน และให้ออกซิเจน อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลาทั้งสิ้น 15 วัน โดยเปลี่ยนสารละลายทุก 3 วัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองพืชจะถูกล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกลั่นให้สะอาดตามลำดับ จากนั้น ชั่งน้ำหนัก วัดความยาวราก ความยาวลำต้น และนับจำนวนใบหลังการทดลอง เพื่อวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืช พืชจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนตัวลำต้นและราก และนำไปอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 3 วัน เพื่อเตรียมวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในพืช

4. การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในพืช

ตัวอย่างพืช (ลำต้นและราก) ที่ผ่านการอบแห้งจะถูกบดให้เป็นผงละเอียดด้วยโอบดยา ซึ่งตัวอย่างแห้ง 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ และเติมกรดผสมไนตริก (HNO_3) เปอร์คลอริก (HClO_4) อัตราส่วน 2:1 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าให้เข้ากันและนำขวดรูปชมพู่ตั้งบนเครื่องให้ความร้อน (Hot plate) ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 30 นาที เพิ่มอุณหภูมิเป็น 100°C เป็นเวลา 45 นาที เพิ่มอุณหภูมิเป็น 150°C เป็นเวลา 45 นาที และเพิ่มอุณหภูมิเป็น 200°C จนกว่าการย่อยจะสมบูรณ์ จากนั้นนำขวดรูปชมพู่ออกจากเครื่องดูดควัน ทิ้งไว้ให้เย็น เติมน้ำกลั่น และนำตัวอย่างไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.42 ปรับปริมาตรสารละลายเป็น 25 มิลลิลิตร เก็บตัวอย่างสารละลายในขวดพลาสติก และนำตัวอย่างสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักชนิดเปลวไฟ (FAAS)

5. การวิเคราะห์ผลการศึกษาและสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการศึกษา

5.1 อัตราการเติบโตของพืช (Relative Growth Rate; RGR)

อัตราการเจริญเติบโตของพืช คำนวณได้จากสูตร (Hunt, 2003)

$$\text{RGR} = \frac{[\ln(w_2) - \ln(w_1)]}{(t_2 - t_1)}$$

w_1 คือ น้ำหนักสดพืชก่อนการทดลอง

w_2 คือ น้ำหนักสดพืชหลังการทดลอง

t_1 คือ วันที่เริ่มทำการทดลอง

t_2 คือ วันที่สิ้นสุดการทดลอง

5.2 เปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะหนัก (% Uptake)

เปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะหนัก คำนวณได้จากสูตร (Abdel-Halim et al., 2003)

$$\% \text{ uptake} = \frac{(C_0 - C_1)}{C_0} \times 100$$

C_0 คือ ความเข้มข้นโลหะหนักในสารละลายก่อนการทดลอง

C_1 คือ ความเข้มข้นโลหะหนักในสารละลายหลังการทดลอง

5.3 อัตราส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักในลำต้นต่อราก (Translocation Factor; TF)

อัตราส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักในส่วนลำต้นต่อส่วนราก เป็นค่าที่ใช้วัดความสามารถของพืชในการลำเลียงโลหะหนักจากรากไปส่วนลำต้นของพืช โดยคำนวณได้จากสูตร (Mattina et al., 2003)

$$TF = \frac{\text{ความเข้มข้นโลหะหนักในส่วนลำต้น (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)}}{\text{ความเข้มข้นโลหะหนักในส่วนราก (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)}}$$

5.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การเจริญเติบโต และการสะสมโลหะหนักของทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) ถูกเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลอง โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ถ้ามีความแตกต่างกัน ($p < 0.05$) จะทดสอบความแตกต่างเชิงซ้อนโดยวิธี LSD ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยโปรแกรม SPSS

ผลการวิจัย

1. การเจริญเติบโตของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะหนัก

1.1 สารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม

น้ำหนักและอัตราการเติบโตของทานตะวันที่ถูกปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0.25 ถึง 1 มิลลิกรัม/ลิตร ไม่แตกต่างจากทานตะวันที่ไม่ได้รับแคดเมียม ($p > 0.05$) ขณะที่พืชที่ได้รับแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัม/ลิตร มีน้ำหนักและอัตราการเติบโตลดลง ($p < 0.05$) (ตารางที่ 1) จากการทดลองนี้ ทำให้ได้ข้อมูลความเข้มข้นของแคดเมียมไปทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมของทานตะวันต่อ โดยจะศึกษาที่ความเข้มข้นสูงสุด 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร

1.2 สารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสี

น้ำหนักและอัตราการเติบโตของทานตะวันที่ถูกปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 1.25 มิลลิกรัม/ลิตร ไม่แตกต่างจากทานตะวันที่ไม่ได้รับสังกะสี ($p > 0.05$) ขณะที่พืชที่ได้รับสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 2.5 ถึง 10 มิลลิกรัม/ลิตร มีน้ำหนักและอัตราการเติบโตลดลงจนตายในที่สุดเมื่อความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายมากกว่า 5 มิลลิกรัม/ลิตร ($p < 0.05$) (ตารางที่ 2) จากการทดลองนี้ ทำให้ได้ข้อมูลความเข้มข้นของสังกะสีไปทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีของทานตะวันต่อ โดยจะศึกษาที่ความเข้มข้นสูงสุด 1 มิลลิกรัม/ลิตร

2. ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะหนัก

2.1 สารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม

ทานตะวันสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 0.25 และ 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร และมีแนวโน้มการดูดซับลดลงเป็นลำดับเมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมเพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 3)

2.2 สารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสี

ทานตะวันสามารถดูดซับสังกะสีได้ดีที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 1.25 มิลลิกรัม/ลิตร และมีแนวโน้มการดูดซับลดลงเป็นลำดับเมื่อความเข้มข้นของสังกะสีเพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 4)

3. การเจริญเติบโตของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน

ทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลาย (0.2 มิลลิกรัม/ลิตร) ส่งผลให้พืชน้ำหนักและอัตราการเติบโตเพิ่มสูงขึ้น ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณสังกะสีที่สูงขึ้น (0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร) ทำให้การเจริญเติบโตของพืชมีแนวโน้มลดลง ($p > 0.05$) ขณะที่พืชที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.3 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย มีแนวโน้มทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับความเข้มข้นสังกะสี 1 มิลลิกรัม/ลิตร ยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลายแร่ธาตุที่มีสังกะสี (0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร) จะทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง ($p < 0.05$) (ตารางที่ 5)

4. ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน

ทานตะวันที่ปลูกในสารละลายที่ทำการเติมแคดเมียมที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร มีการดูดซับแคดเมียมเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร และมีแนวโน้มการดูดซับแคดเมียมลดลงตามลำดับเมื่อความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายเพิ่มขึ้น ส่วนทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.3 มิลลิกรัม/ลิตร มีแนวโน้มการดูดซับแคดเมียมลดลงเมื่อความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 6 ก))

การดูดซับสังกะสีของทานตะวันในสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกันพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสังกะสีเพิ่มขึ้น พืชมีแนวโน้มในการดูดซับสังกะสีลดลง ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันในทุกความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลาย ยกเว้นพืชที่ปลูกในสารละลายที่ไม่ได้ทำการเติมแคดเมียม พืชจะดูดซับสังกะสีเพิ่มขึ้นที่ระดับความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร (ตารางที่ 6 ข))

ตารางที่ 1 แสดงการเจริญเติบโตของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

(0, 0.25, 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัม/ลิตร) เป็นเวลา 15 วัน

ความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	น้ำหนักพืช (กรัม)	อัตราการเติบโต (มิลลิกรัม/วัน)
0	9.797 ± 2.670^{ab}	18.856 ± 4.171^{ab}
0.25	10.590 ± 3.818^{ab}	22.954 ± 8.036^{ab}
0.5	10.760 ± 3.663^a	24.214 ± 6.313^a
1.0	7.340 ± 1.724^{bc}	15.006 ± 2.459^{bc}
2.0	3.708 ± 1.072^c	8.164 ± 2.080^c

หมายเหตุ : อักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแต่ละสัณภูมิ แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD

ตารางที่ 2 แสดงการเจริญเติบโตของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสีที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

(0, 1.25, 2.5, 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร) เป็นเวลา 15 วัน

ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	น้ำหนักพืช (กรัม)	อัตราการเติบโต (มิลลิกรัม/วัน)
0	9.797 ± 2.670^a	18.856 ± 4.171^a
1.25	8.464 ± 1.272^a	18.840 ± 4.760^a
2.5	4.010 ± 2.744^b	10.199 ± 5.945^a
5.0	d.p.	d.p.
10.0	d.p.	d.p.

หมายเหตุ : 1. d.p. (dead plant) = ต้นไม้ตาย

2. อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละสมการ แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD

ตารางที่ 3 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมของทานตะวัน ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (0, 0.25, 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัม/ลิตร) เป็นเวลา 15 วัน

ความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	การดูดซับแคดเมียมของพืช (เปอร์เซ็นต์)
0	0
0.25	81.85
0.5	85.27
1	63.60
2	34.45

ตารางที่ 4 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับสังกะสีของทานตะวัน ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (0, 1.25, 2.5, 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร) เป็นเวลา 15 วัน

ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	การดูดซับสังกะสีของพืช (เปอร์เซ็นต์)
0	0
1.25	82.55
2.5	53.93
5	57.08
10	21.44

ตารางที่ 5 แสดงน้ำหนัก (ก) และ อัตราการเจริญเติบโต (ข) ของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 15 วัน

(ก) น้ำหนักพืช (กรัม)

ความเข้มข้นแคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	6.202 ± 1.542 ^{a,A}	9.238 ± 1.202 ^{a,B}	8.348 ± 1.699 ^{a,AB}	6.330 ± 1.937 ^{a,A}
0.1	6.025 ± 0.963 ^{a,A}	7.795 ± 1.405 ^{ab,B}	7.132 ± 0.935 ^{ab,AB}	3.443 ± 0.557 ^{b,C}
0.3	5.513 ± 1.020 ^{a,A}	5.095 ± 1.636 ^{b,A}	5.050 ± 1.859 ^{b,A}	3.518 ± 1.199 ^{b,A}
0.5	6.203 ± 0.885 ^{a,A}	5.520 ± 3.207 ^{b,A}	5.646 ± 2.430 ^{b,A}	3.193 ± 0.850 ^{b,A}

(ข) อัตราการเติบโต (มิลลิกรัม/วัน)

ความเข้มข้นแคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	37.656 ± 6.914 ^{a,A}	49.425 ± 4.381 ^{a,B}	44.904 ± 7.133 ^{a,AB}	35.137 ± 8.578 ^{a,A}
0.1	32.670 ± 3.727 ^{a,AB}	38.709 ± 5.370 ^{a,B}	34.542 ± 3.290 ^{a,AB}	29.478 ± 3.683 ^{ab,A}

0.3	41.365 ± 5.482 ^{a,A}	37.679 ± 9.544 ^{a,A}	36.462 ± 9.108 ^{a,A}	26.852 ± 7.797 ^{ab,A}
0.5	41.333 ± 4.563 ^{a,A}	35.168 ± 9.113 ^{a,A}	35.522 ± 9.562 ^{a,A}	22.649 ± 5.229 ^{b,A}

หมายเหตุ : 1. อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละสมรค์ แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD

2. อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD

ตารางที่ 6 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียม (ก) และ สังกะสี (ข) ของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 15 วัน

(ก) การดูดซับแคดเมียม (%)

ความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	-	-	-	-
0.1	93.71	96.50	90.84	60.56
0.3	51.62	42.96	39.01	37.61
0.5	43.47	38.41	33.10	45.41

(ข) การดูดซับสังกะสี (%)

ความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	91.41	93.37	85.62	51.59
0.1	95.59	86.22	75.18	30.59
0.3	85.16	33.84	19.96	18.29
0.5	84.21	33.81	18.20	30.73

5. การสะสมโลหะหนักในลำต้นและรากของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน

ทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร การเพิ่มความเข้มข้นสังกะสีจะส่งผลให้ ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในลำต้นจะเพิ่มสูงขึ้น ($p < 0.05$) ขณะที่พืชที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.3 มิลลิกรัม/ลิตร การเติมสังกะสีที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ไม่ได้ช่วยเพิ่มการสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นของพืช ($p > 0.05$) (ตารางที่ 7 (ก)) การเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลายที่มีสังกะสีความเข้มข้น 0, 0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าพืชมีการสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นและรากเพิ่มสูงขึ้น ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 7) และเมื่อดูภาพรวมการสะสมจะพบว่าการสะสมของแคดเมียมในทานตะวันนั้นมีการสะสมที่รากมากกว่าที่ลำต้น

ในส่วนปริมาณสังกะสีในลำต้นและรากของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายที่มีแคดเมียมและสังกะสีอยู่ร่วมกัน แสดงดังตารางที่ 8 พบว่าปริมาณสังกะสีในลำต้นของพืชลดลงตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เพิ่มสูงขึ้น ($p < 0.05$) ขณะที่ปริมาณสังกะสีในส่วนรากไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เพิ่มสูงขึ้น ($p > 0.05$) การเพิ่มความเข้มข้นสังกะสีในสารละลายแร่ธาตุที่มีแคดเมียมความเข้มข้น (0, 0.1, 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร) พบว่าพืชมีการสะสมสังกะสีในส่วนลำต้นและรากเพิ่มสูงขึ้น ตามระดับความเข้มข้นของสังกะสีที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 7 แสดงปริมาณแคดเมียมในลำต้น (ก) และราก (ข) ของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 15 วัน

(ก) ปริมาณแคดเมียมในลำต้น (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

ความเข้มข้นแคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
0.1	21.286 ± 5.356 ^{a,A}	29.976 ± 10.918 ^{a,AB}	30.044 ± 7.027 ^{a,AB}	33.289 ± 7.850 ^{a,B}
0.3	106.929 ± 8.679 ^{b,A}	102.114 ± 16.682 ^{b,A}	117.021 ± 15.865 ^{b,A}	105.458 ± 9.144 ^{b,A}
0.5	179.702 ± 33.179 ^{c,A}	154.120 ± 23.292 ^{c,A}	152.269 ± 11.437 ^{c,A}	160.619 ± 17.828 ^{c,A}

(ข) ปริมาณแคดเมียมในราก (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

ความเข้มข้น แคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
0.1	234.433 ± 103.335 ^{a,A}	216.886 ± 86.746 ^{a,A}	173.519 ± 70.739 ^{a,A}	135.706 ± 88.988 ^{a,A}
0.3	450.250 ± 56.824 ^{b,A}	278.474 ± 80.443 ^{a,BC}	266.955 ± 111.372 ^{a,B}	418.160 ± 126.043 ^{b,AC}
0.5	600.420 ± 158.630 ^{b,A}	492.776 ± 74.864 ^{b,A}	485.191 ± 111.204 ^{b,A}	597.356 ± 76.344 ^{c,A}

หมายเหตุ : 1. อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแต่ละสมรค์ แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD

2. อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแต่ละแถว แสดงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD

ตารางที่ 8 แสดงปริมาณสังกะสีในลำต้น (ก) และราก (ข) ของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 15 วัน

(ก) ปริมาณสังกะสีในลำต้น (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

ความเข้มข้น แคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	77.768 ± 6.971 ^{a,A}	204.628 ± 29.114 ^{a,B}	429.880 ± 48.300 ^{a,C}	407.867 ± 66.420 ^{a,C}
0.1	61.972 ± 5.291 ^{b,A}	205.018 ± 37.606 ^{a,B}	326.053 ± 89.245 ^{b,C}	360.858 ± 56.005 ^{ab,C}
0.3	67.796 ± 11.701 ^{ab,A}	122.870 ± 16.236 ^{b,B}	254.145 ± 31.233 ^{bc,C}	325.476 ± 30.346 ^{b,D}
0.5	60.684 ± 12.094 ^{b,A}	121.359 ± 14.584 ^{b,B}	226.064 ± 4.788 ^{c,C}	339.128 ± 43.119 ^{ab,D}

(ข) ปริมาณสังกะสีในราก (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

ความเข้มข้น แคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	52.231 ± 28.843 ^{a,A}	207.673 ± 38.537 ^{a,B}	450.085 ± 149.657 ^{a,C}	621.003 ± 123.065 ^{a,D}
0.1	56.285 ± 18.196 ^{a,A}	193.091 ± 51.697 ^{a,B}	516.659 ± 47.494 ^{a,C}	607.624 ± 48.440 ^{a,D}
0.3	64.511 ± 26.309 ^{a,A}	155.093 ± 38.014 ^{a,B}	338.444 ± 36.907 ^{b,C}	600.636 ± 115.218 ^{a,D}
0.5	72.712 ± 17.168 ^{a,A}	202.803 ± 31.539 ^{a,B}	391.493 ± 37.617 ^{a,C}	674.550 ± 74.340 ^{a,D}

- หมายเหตุ : 1. อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละสมการ แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD
2. อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD

6. อัตราส่วนความเข้มข้นโลหะหนักส่วนลำต้นและรากของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน

ทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายที่เติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อระดับความเข้มข้นสังกะสีในสารละลายเพิ่มขึ้น (0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร) อัตราส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมส่วนลำต้นและรากเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่พืชที่ปลูกด้วยสารละลายที่เติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อเติมสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 0.2 และ 0.6 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่ามีอัตราส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมส่วนลำต้นและรากเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของสังกะสีเป็น 1 มิลลิกรัม/ลิตร กลับพบว่าอัตราส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมส่วนลำต้นและรากลดลง (ตารางที่ 9 (ก))

อัตราส่วนความเข้มข้นของสังกะสีส่วนลำต้นและรากของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายที่มีแคดเมียมและสังกะสีอยู่ร่วมกัน แสดงดังตารางที่ 9 (ข) พืชที่ปลูกด้วยสารละลายที่ไม่ได้เติมแคดเมียมแต่เติมสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่ามีอัตราส่วนความเข้มข้นของสังกะสีส่วนลำต้นและรากลดลงตามความเข้มข้นของสังกะสีที่เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเป็น 0.1, 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า อัตราส่วนความเข้มข้นของสังกะสีส่วนลำต้นและรากของพืชลดลงตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 9 อัตราส่วนความเข้มข้นโลหะหนักส่วนลำต้นและราก (Translocation Factor; TF) สำหรับแคดเมียม (ก) และ สังกะสี (ข) ของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 15 วัน

(ก) อัตราส่วนความเข้มข้นแคดเมียม

ความเข้มข้นแคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	-	-	-	-
0.1	0.091	0.138	0.173	0.245
0.3	0.237	0.367	0.438	0.252
0.5	0.299	0.313	0.314	0.269

(ข) อัตราส่วนความเข้มข้นสังกะสี

ความเข้มข้นแคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	1.489	0.985	0.955	0.657
0.1	1.101	1.062	0.631	0.594
0.3	1.050	0.792	0.751	0.542
0.5	0.835	0.598	0.577	0.503

การอภิปรายผล

1. การเจริญเติบโตและการดูดซับแคดเมียมของทานตะวันที่ถูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม

ทานตะวันที่ถูกปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม ที่ระดับความเข้มข้นไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร มีการเจริญเติบโตไม่แตกต่างจากพืชที่ไม่ได้รับแคดเมียม นอกจากนั้นยังสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีโดยไม่แสดงอาการเป็นพิษ การที่พืชสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่มีแคดเมียมต่ำ อาจเนื่องมาจากเซลล์พืชมีกลไกลดความเป็นพิษของแคดเมียม จึงทำให้กระบวนการทางสรีรวิทยาที่สำคัญของพืชสามารถทำงานได้อย่างปกติ แม้ว่าธาตุแคดเมียมจะเป็นธาตุที่ไม่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช (Non-essential element) แต่ถ้ามีอยู่ในปริมาณต่ำ พืชจะสามารถดูดซับและมีกลไกเก็บสะสมเพื่อลดความเป็นพิษของโลหะหนักต่อเซลล์ จึงทำให้พืชเจริญเติบโตได้อย่างปกติ อย่างไรก็ตามปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่สูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช ทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลงและอาจทำให้พืชตายได้ (Jadia and Fulekar, 2009) ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายเพิ่มสูงขึ้นเกินกว่า 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร การเจริญเติบโตและความสามารถในการดูดซับแคดเมียมลดลง อาจเกิดเนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลาย ทำให้พืชดูดซับแคดเมียมเพิ่มมากขึ้น การดูดซับแคดเมียมเพิ่มมากขึ้น ทำให้พืชต้องใช้พลังงานไปกับกระบวนการเก็บสะสมแคดเมียม เพื่อลดความเป็นพิษต่อเซลล์ (Baker, 1981) จึงทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง นอกจากนั้นการดูดซับแคดเมียมที่มากขึ้นจนเกินความสามารถของกระบวนการลดความเป็นพิษของเซลล์พืช แคดเมียมอาจรบกวนการทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆ ภายในเซลล์ จนทำให้กระบวนการทำงานต่าง ๆ ของเซลล์ผิดปกติไป และอาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของรากพืช จึงทำให้กระบวนการดูดซับน้ำและแร่ธาตุต่าง ๆ ของพืชได้รับผลกระทบ การศึกษาของ Pandey and Sharma (2002) แสดงให้เห็นว่า แคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นสูง (500 μM) เป็นพิษต่อกะหล่ำปลี โดยแคดเมียมรบกวนการดูดซับธาตุเหล็ก ส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ในใบพืชลดลง ก่อให้เกิดอาการเหลืองซีด (Chlorosis) และทำให้ขอบใบเกิดสีม่วง นอกจากนี้การลำเลียงน้ำและอัตราการคายน้ำของพืชลดลง ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าทานตะวันสามารถเจริญเติบโตได้อย่างปกติ และสามารถดูดซับแคดเมียมได้ หากถูกปลูกบนสารละลายที่มีแคดเมียมระดับความเข้มข้นไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร

2. การเจริญเติบโตและการดูดซับสังกะสีของทานตะวันที่ถูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสี

ทานตะวันที่ถูกปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสี ที่ระดับความเข้มข้นไม่เกิน 1.25 มิลลิกรัม/ลิตร มีการเจริญเติบโตไม่แตกต่างจากพืชที่ถูกเลี้ยงในสารละลายแร่ธาตุซึ่งไม่เติมสังกะสี สังกะสีเป็นธาตุอาหารรองสำหรับพืช พืชต้องการสังกะสีในปริมาณที่เหมาะสม การได้รับสังกะสีในปริมาณน้อยเกินไปจะทำให้การเจริญเติบโตของพืชผิดปกติ ในทางกลับกันการได้รับสังกะสีมากเกินไปจะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชได้ Coleman (1992) พบว่าสังกะสีมีบทบาทเกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของสารพันธุกรรม (DNA และ RNA) การสังเคราะห์โปรตีน การแบ่งเซลล์ การเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ (DNA replication) การถอดรหัสพันธุกรรม (Transcription) และบทบาทในการกระตุ้นการทำงานของยีน เนื่องจากเป็น Transcription factor และอาจสามารถกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ได้หลายชนิด โดยทำหน้าที่เป็น Cofactor ดังนั้นสังกะสีในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าหากเพิ่มความเข้มข้นสังกะสีในสารละลายมากกว่า 1.25 มิลลิกรัม/ลิตร พืชจะมีการเจริญเติบโตและการดูดซับสังกะสีลดลง แสดงให้เห็นว่าปริมาณความเข้มข้นสังกะสีในสารละลายเกินความต้องการที่พืชจะนำไปใช้ประโยชน์ และก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช สังกะสีที่เกินความต้องการของพืช พืชจะต้องมีกลไกในการเก็บสะสมเพื่อลดความเป็นพิษของสังกะสี ซึ่งพืชต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งไปกับกระบวนการลดความเป็นพิษ (Baker, 1981) การศึกษาของ ยงยุทธ (2546) แสดงให้เห็นว่าพืชที่ได้รับสังกะสีในปริมาณมากเกินไปจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ สังกะสีจะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช เช่น ทำให้รากพืชหยุดการเจริญเติบโต อัตราการดูดซับน้ำลดน้อยลง จึงส่งผลให้การดูดซับแร่ธาตุที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชลดลงด้วย ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า

เห็นว่าทานตะวันสามารถเจริญเติบโตได้อย่างปกติ และสามารถดูดซับสังกะสีได้ หากถูกปลูกบนสารละลายที่มีสังกะสีระดับความเข้มข้นไม่เกิน 1.25 มิลลิกรัม/ลิตร

3. การเจริญเติบโต และการสะสมแคดเมียมและสังกะสีของทานตะวันที่ถูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน

ทานตะวันที่ถูกปลูกบนสารละลายแร่ธาตุที่ไม่เติมแคดเมียม การเพิ่มความเข้มข้นของสังกะสี (0.2 และ 0.6 มิลลิกรัม/ลิตร) ส่งผลให้การเจริญเติบโตของพืชเพิ่มมากขึ้น อาจเนื่องมาจากสังกะสีในระดับความเข้มข้นดังกล่าว เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เนื่องมาจากสังกะสีเป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อการสร้างคลอโรฟิลล์ในใบของพืช และยังช่วยให้กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชทำงานได้อย่างปกติ ส่งเสริมการดูดซึมน้ำและแร่ธาตุอาหารของพืช (Zekri and Obreza, 2003) นอกจากนี้ในระดับเซลล์ สังกะสีมีบทบาทเกี่ยวกับกระบวนการสังเคราะห์สารพันธุกรรม โปรตีน และกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆ ภายในเซลล์ (Coleman, 1992) อย่างไรก็ตามการเพิ่มสังกะสีในสารละลายสูงถึง 1 มิลลิกรัม/ลิตร ไม่ส่งผลให้การเจริญเติบโตของพืชเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าธาตุที่มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต (Essential element) ถ้าได้รับในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช แต่ถ้าได้รับในปริมาณที่มากเกินไปจนความจำเป็นในการนำไปใช้ประโยชน์ก็จะส่งผลความเป็นพิษต่อพืชได้ (Jadia and Fulekar, 2009)

จากการทดลองครั้งนี้พบว่าปริมาณสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 0.2 และ 0.6 มิลลิกรัม/ลิตร นอกจากจะช่วยการเจริญเติบโตของทานตะวันให้เพิ่มสูงขึ้นแล้ว ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมของทานตะวันที่ถูกปลูกบนสารละลายที่เติมแคดเมียมระดับความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร และทำให้พืชสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นเพิ่มสูงขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าการเจริญเติบโตที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการได้รับสังกะสีในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้พืชมีความแข็งแรงและสามารถดูดซับแคดเมียมได้สูงขึ้นด้วย มีรายงานการวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าสังกะสีในปริมาณที่เหมาะสมช่วยเพิ่มการดูดซับแคดเมียมของข้าวสาลี (Reinhold, 1976) ต้นถั่ว และข้าวฟ่างญี่ปุ่น (Francis and Rush, 1973) อย่างไรก็ตามการศึกษาในต้นมะเขือเทศ พบว่าการเพิ่มสังกะสีในสารละลายที่มีแคดเมียมอยู่ด้วย ไม่ได้ช่วยการดูดซับแคดเมียมไปสะสมในส่วนลำต้นเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักไปสะสมยังส่วนลำต้นของพืชนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์พืชที่นำมาใช้ในการศึกษา อาจเนื่องมาจากพันธุกรรมของพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน จึงทำให้กระบวนการดูดซับ หรือการลดความเป็นพิษของโลหะหนักมีความแตกต่างกัน (Newman et al., 1997)

การศึกษานี้พบว่า การเพิ่มระดับความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลายที่มีสังกะสีระดับความเข้มข้น 0, 0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร ส่งผลให้ทานตะวันดูดซับและลำเลียงสังกะสีไปสะสมในส่วนลำต้นได้น้อยลง แสดงให้เห็นว่าการดูดซับแคดเมียมรบกวนการดูดซับและการสะสมสังกะสีในพืช มีรายงานการวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าแคดเมียมรบกวนการดูดซับสังกะสีของพืช เช่น Root et al. (1975) ที่พบว่าปริมาณสังกะสีในข้าวโพดลดน้อยลงเมื่อปริมาณแคดเมียมในสารละลายเพิ่มขึ้น Hawf and Schmid (1967) พบว่าแคดเมียมสามารถยับยั้งการดูดซับสังกะสีในพืชวงศ์ถั่ว อย่างไรก็ตาม Kim and Mooto (1978) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มแคดเมียมกลับช่วยเพิ่มการดูดซับสังกะสีในมะเขือเทศ ดังนั้นการดูดซับและการลำเลียงแคดเมียมและสังกะสีในพืชอาจมีทั้งส่งเสริมและแข่งขัน (Kim and Motto, 1978; Smith and Brennan, 1983) โดยขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์ของพืช เพราะพืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการเลือกดูดซับและลำเลียงแร่ธาตุที่แตกต่างกัน (Newman et al., 1997)

แคดเมียมมีการสะสมในส่วนรากพืชในปริมาณสูง เนื่องมาจากโลหะหนักที่ลำเลียงผ่านเส้นทางอะพลาสต (Apoplastic pathway) ซึ่งเป็นเส้นทางการลำเลียงผ่านผนังเซลล์และช่องว่างระหว่างเซลล์ โลหะหนักซึ่งมีประจุบวกจะจับกับประจุลบที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ และลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักไปสู่ท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) นอกจากนี้ในชั้นเอนโดเดอร์มิส (Endodermis) ซึ่งมีแคสพาเรียน สตรีป (Casparian strip) ซึ่งเป็นชั้นที่สารละลายไม่สามารถผ่านได้ ยังขัดขวางการเคลื่อนที่ของโลหะหนักไปยังท่อลำเลียงน้ำอีกด้วย ดังนั้นการลำเลียงโลหะหนักในรากพืชผ่านเส้นทางอะพลาสตไปยังท่อลำเลียงน้ำ

เพื่อลำเลียงต่อไปยังลำต้น จะเกิดขึ้นได้ดีในรากอ่อนที่ชั้นเอ็นโดเดอร์มิสยังมีการพัฒนาไม่สมบูรณ์ Jadia and Fulekar (2008) พบว่าการลำเลียงแคดเมียมในต้นทานตะวันจะถูกลำเลียงผ่านทางช่องว่างระหว่างเซลล์หรือเส้นทางอะพลาสต (Apoplastic pathway) มากกว่าการลำเลียงผ่านเข้าภายในเซลล์ (Symplastic pathway) จึงทำให้แคดเมียมซึ่งมีประจุบวกส่วนใหญ่ถูกจับกับโครงสร้างผนังเซลล์ที่มีประจุลบ เช่น เซลลูโลส (Cellulose), เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) หรือไกลโคโปรตีน (Glycoprotein) จึงทำให้มีความเป็นไปได้ว่า พืชจะมีการสะสมแคดเมียมในส่วนรากมากกว่าในส่วนลำต้น และการลำเลียงโลหะหนักส่วนมาก โดยเฉพาะโลหะที่ไม่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโต จะใช้เส้นทางการลำเลียงแบบอะพลาสต (Harborne, 1989; Robinson et al., 1994)

ทานตะวันที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีความสามารถในการลำเลียงและสะสมโลหะหนักแคดเมียมในส่วนลำต้นได้มากกว่า 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม มวลแห้ง ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่ใช้ในการจัดกลุ่มพืชว่าเป็นพืชดูดซับแคดเมียมปริมาณสูง (Baker, 1981) โดยที่พืชไม่แสดงอาการเป็นพิษใด ๆ จึงจัดได้ว่าทานตะวันเป็นพืชที่สามารถดูดซับแคดเมียมในปริมาณสูง

บทสรุป

การเจริญเติบโตของทานตะวันในสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร จะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสังกะสีในสารละลายมีความเข้มข้น 0.2 และ 0.6 มิลลิกรัม/ลิตร ขณะที่ถ้าเพิ่มปริมาณสังกะสีในสารละลายที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/ลิตร พืชจะมีการเติบโตลดลง แสดงให้เห็นว่าเป็นสังกะสีปริมาณที่สูงเกินไปอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชได้ แต่การเพิ่มปริมาณสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 0.2 และ 0.6 มิลลิกรัม/ลิตร สังกะสีจะช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ดีขึ้น การที่พืชเจริญเติบโตได้ดีขึ้น พืชจะสามารถดูดซับและสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นได้มากขึ้น ในขณะที่ในสารละลายที่มีสังกะสีทุกความเข้มข้น (0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร) เมื่อปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายเพิ่มสูงขึ้น การดูดซับสังกะสีลดน้อยลงตามลำดับ ไม่เพียงการดูดซับลดลงเท่านั้นการเจริญเติบโตของพืชยังลดลงด้วย จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้พบว่า ทานตะวันมีการสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นได้มากกว่า 100 มิลลิกรัม/ลิตร จึงจัดว่าทานตะวันเป็นพืชดูดซับแคดเมียมปริมาณสูง

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2556). จดหมายข่าว ฟันฟูลิตี ปีที่ 1 ฉบับที่ 1. ค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2565.
<https://www.pcd.go.th/publication/6426/>.
- ยงยุทธ โอสดสภา. (2546). ธาตุอาหารพืช. (พิมพ์ครั้งที่ 2). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร.
- Abdel-Halim S.H., Shehata A.M.A. and El-Shahat M.F. (2003). Removal of lead ions from industrial waste by different type of natural materials. Water Research. 37: 1678–1683.
- Adesodun J., Atayese M., Agbaje T., Osadiaye B., Mafe O. and Soretire A. (2010). Phytoremediation potentials of sunflowers (*Tithonia diversifolia* and *Helianthus annuus*) for metals in soils contaminated with zinc and lead nitrates. Water Air & Soil Pollution. 207: 195–201.
- Ahalya N., Ramachandra T.V. and Kanamadi R.D. (2003). Biosorption of heavy metals. Research Journal of Chemistry and Environment. 7(4): 71–79.
- Ali H., Khan E. and Sajad M.A. (2013). Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications. Chemosphere. 91: 869 – 881.

- Baker A.J.M. (1981). Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*. 3: 1–4.
- Chantachon S., Krutrachue M. and Pokethitiyooketa P. (2004). Phytoextraction and accumulation of lead from contaminated soil by Vetiver grass: laboratory and simulated field study. *Water Air & Soil Pollution*. 154: 37–55.
- Chintakovid W., Visootviseth P., Khokiattiwong S. and Lauengsuchonkul S. (2008). Potential of the hybrid marigolds for arsenic phytoremediation and income generation of remediators in Ron Phibun District, Thailand. *Chemosphere*. 70: 1532-1537.
- Coleman J.E. (1992). Zinc proteins: enzymes, storage proteins, transcription factors and replication proteins. *Annual Review of Biochemistry*. 61: 897–946.
- Francis C.W. and Rush S.G. (1973). Factors affecting uptake and distribution of cadmium in plants. In Hemphill D.D., Editor. *Trace substances in environmental health*. University of Missouri Press: Columbia. 75–81.
- Harborne J.B. (1989). *Introduction to ecological biochemistry*. Academic Press: New York.
- Hawf L.R. and Schmid W.E. (1967). Uptake and translocation of zinc by intact plants. *Plant and Soil*. 2: 249–260.
- Hunt R. (2003). Growth analysis, individual plants. In Thomas B., Murphy D.J. and Murray D., Editors. *Encyclopaedia of applied plant science*. Academic Press: London. 579–588.
- Jadia C.D. and Fulekar M.H. (2008). Phytoremediation: the application of vermicompost to remove zinc, cadmium, copper, nickel and lead by sunflower plant. *Environmental Engineering and Management Journal*. 7(5): 547–558.
- Jadia C.D. and Fulekar M.H. (2009). Phytoremediation of heavy metals: recent techniques. *African Journal of Biotechnology*. 8(6): 921–928.
- Kim M.J. and Motto H.L. (1978). Effects of zinc, phosphorus and iron on the cadmium uptake and accumulation by hydroponically grown tomato. *Journal of the Korean Agricultural Chemical Society*. 21(1): 40–50.
- Kötschau A., Büchel G., Einax J.W., Tümping W.V. and Merten D. (2014). Sunflower (*Helianthus annuus*): phytoextraction capacity for heavy metals on a mining-influenced area in Thuringia, Germany. *Environmental Earth Science*. 72: 2023-2031.
- La-up A., Mahasakpan P. and Saengow U. (2021). The current status of osteoporosis after 15 years of reduced cadmium exposure among residents living in cadmium-contaminated areas in northwestern Thailand. *Environmental Science and Pollution Research*. 28: 20121–20127.
- Mattina M.J.I., Lannucci-Berger W., Musante C. and White J.C. (2003). Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil. *Environmental Pollution*. 124: 375–378.
- Newman L.A., Strand S.E., Choe N., Duffy J., Ekuon G., Ruszaj M., Shurtleff B.B., Wilmoth J., Heliman P. and Gordon M.P. (1997). Uptake and biotransformation of trichloroethylene by hybrid poplars. *Environmental Science & Tehnology*. 31(4): 1062–1067.

- Pandey N. and Sharma C.P. (2002). Effect of heavy metals Co, Ni and Cd on growth and metabolism of cabbage. *Plant Science*. 163: 753–758.
- Phaenark C., Pokethitiyook P., Kruatrachue M. and Ngernsansaruay C. (2009). Cd and Zn accumulation in plants from the Padaeng Zn mine area. *International Journal of Phytoremediation*. 11: 479–495.
- Reinhold J.G., Faradji B., Abadi P. and Ismail-Beigi F. (1976). Decreased absorption of calcium, magnesium, zinc and phosphorus by humans due to increased fiber and phosphorus consumption as wheat bread. *The Journal of Nutrition*. 106(4): 493–503.
- Robinson N.J., Urwin P.E., Robinson P.J. and Jackson P.J. (1994). Gene expression in relation to metal toxicity and tolerance. Harwood Academic Publisher: New York.
- Root R.A., Miller R.J. and Koeppel D.E. (1975). Uptake of cadmium-its toxicity, and effect on the iron ratio in hydroponically grown corn. *Journal of Environmental Quality*. 4(4): 473–476.
- Rotkittikhun P., Chaiyarat R., Kruatrachue M., Pokethitiyook P. and Baker A.J.M. (2007). Growth and lead accumulation by the grasses *Vetiveria zizanioides* and *Thysanolaena maxima* in lead-contaminated soil amended with pig manure and fertilizer: A glasshouse study. *Chemosphere*. 66: 45-53.
- Rotkittikhun P., Kruatrachue M., Chaiyarat R., Ngernsansaruay C., Pokethitiyook P., Pajitprapaporn A. and Baker A.J.M. (2006). Uptake and accumulation of lead by plants from the Bo Ngam lead mine area in Thailand. *Environmental Pollution*. 144: 681-688.
- Shaheen S.M. and Rinklebe J. (2015). Phytoextraction of potentially toxic elements by Indian mustard, rapeseed, and sunflower from a contaminated riparian soil. *Environmental Geochemistry and Health*. 37: 953–967.
- Simmons R.W., Pongsakul P., Saiyasitpanich D. and Klinphoklap S. (2005). Elevated levels of cadmium and zinc in paddy soils and elevated levels of cadmium in rice grain downstream of a zinc mineralized area in Thailand: Implications for public health. *Environmental Geochemistry and Health*. 27: 501–511.
- Smith G.C. and Brennan E. (1983). Cadmium–zinc interrelationships in tomato plants. *Phytopathology*. 73: 879–882.
- Visoottiviseth P., Francesconi K. and Sridokchan W. (2002). The potential of Thai indigenous plant species for the phytoremediation of arsenic contaminated land. *Environmental Pollution*. 118(3): 453-461.
- Waranusantigul P., Kruatrachue M., Pokethitiyook P. and Auesukaree C. (2008). Evaluation of Pb phytoremediation potential in *Buddleja asiatica* and *B. paniculata*. *Water Air & Soil Pollution*. 193: 79-90.
- Zekri M. and Obreza T.A. (2003). Micronutrient deficiencies in citrus: iron, zinc, and manganese. University of florida: Florida.