

การสะสมตะกั่วในพริก คะน้า และหัวไชเท้าที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว

Lead Accumulation in Chili, Kale and Radish Grown in Lead Contaminated Soil

ธนิกา น้อยถนอม, สุภาพร ทันทประเสริฐ, จารุณี แซ่คู และธนวรรณ พาณิชพัฒน์*

หลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์

คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ถนนมาลัยแมน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Taniga Noitanom, Supaporn Tantaprasert, Jarunee Saekoo and Thanawan Panich-pat*

Environmental Science and Technology Program, Department of Science,

Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus,

Malaiman Road, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องการสะสมตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของพริก (*Capsicum frutescens* L.) คะน้า (*Brassica oleracea*) และหัวไชเท้า (*Raphanus sativus* L.) ที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วจากบ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี นี้ ได้ทดลองในโรงเรือน ณ ฝายปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง สถาบันวิจัยและพัฒนากำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ การทดลองพบว่าการเจริญเติบโตของต้นพริก คะน้า และหัวไชเท้าที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว โดยวัดความสูง น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) พริก คะน้า และหัวไชเท้ามีการสะสมตะกั่วในรากสูงที่สุด (52.42 ± 9.59 , 51.62 ± 4.95 และ 49.20 ± 0.54 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) รองลงมา คือ ลำต้นและใบ (37.48 ± 11.38 , 38.19 ± 8.14 และ 35.59 ± 4.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) และเมล็ดพริก (30.16 ± 11.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งเกินค่ามาตรฐานในการบริโภคเป็นอาหาร คือ 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับพริก คะน้า และหัวไชเท้าในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว พบค่า BCF เฉลี่ย 0.05 ± 0.06 , 0.08 ± 0.02 และ 0.05 ± 0.01 ตามลำดับ แสดงว่าประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของตะกั่วจากดินเข้าสู่ต้นต่ำ และค่า TF ในพริกเฉลี่ย 1.32 ± 0.31 แสดงให้เห็นว่าตะกั่วมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายจากรากเข้าสู่ส่วนเหนือดิน คะน้าและหัวไชเท้ามีค่า TF เฉลี่ยที่ 0.73 ± 0.09 และ 0.72 ± 0.08 น้อยกว่า 1 จึงไม่มีความสามารถในการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากไปสู่ส่วนเหนือดิน

คำสำคัญ : ตะกั่ว; การสะสม; พริก; คะน้า; หัวไชเท้า

Abstract

Research on lead accumulation in different parts of chili (*Capsicum frutescens* L.), kale (*Brassica oleracea*) and radish (*Raphanus sativus* L.) grown in lead contaminated soil from Klity village in Kanchanaburi province was experimentally conducted in the Central laboratory and Greenhouse Complex at Research and Development Institute, Kamphaengsaen campus, Kasetsart university. The results showed that the growth of chili, kale and radish grown in contaminated and uncontaminated soil was not significantly different ($p > 0.05$) by measuring height, fresh weight and dry weight. Chilli, kale and radish had the highest lead accumulation in root (52.42 ± 9.59 , 51.62 ± 4.95 and 49.20 ± 0.54 mg/kg, respectively) followed by shoots (37.48 ± 11.38 , 38.19 ± 8.14 and 35.59 ± 4.03 mg/kg, respectively) and seeds (30.16 ± 11.50 mg/kg), which exceeded the standard for human consumption (0.1 mg/kg). For chilli, kale and radish in lead contaminated soil, the average BCF values of 0.05 ± 0.06 , 0.08 ± 0.02 and 0.05 ± 0.01 , respectively, showed low efficiency in translocation lead from soil to plant. The average TF of chili with 1.32 ± 0.31 showed that lead was capable to move from the roots to the shoots. Kale and radish had averages TF of 0.73 ± 0.09 and 0.72 ± 0.08 , respectively. As they are less than 1, this means no possible to remove the lead from the roots to the shoots.

Keywords: lead; accumulation; chili; kale; radish

1. บทนำ

ปัจจุบันการปนเปื้อนของตะกั่วในดินถือเป็นหนึ่งในปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เป็นอันตรายอย่างมาก เนื่องจากตะกั่วมีความคงทน สลายตัวช้า และมีความเป็นพิษสูง โดยความเข้มข้นของตะกั่วในดินเป็นผลมาจากธรรมชาติหรือเกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เป็นส่วนใหญ่ เช่น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่รถยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมสี รวมทั้งอุตสาหกรรมเหมืองแร่ตะกั่ว การผลิตพลังงานและเชื้อเพลิง รวมถึงการใช้ปุ๋ยและยาปราบศัตรูพืช ก่อให้เกิดความเสียหายและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศ หากทำให้เกิดการปนเปื้อนทั้งในแหล่งน้ำ ดิน หรืออากาศ มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในบริเวณนั้น อาจส่งผลให้เกิดอาการผิดปกติในตับ ไต กระดูก และสามารถทำลายระบบประสาท โดยขึ้นอยู่กับความ

เข้มข้นของตะกั่วและระยะเวลาที่ได้รับเข้าสู่ร่างกาย ตะกั่วไม่สามารถย่อยสลายเองตามธรรมชาติ เกิดเป็นสารตกค้างในสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังสามารถเคลื่อนย้ายเข้าไปสะสมในส่วนต่าง ๆ ของพืช และสามารถถ่ายทอดสู่มนุษย์โดยผ่านทางโซ่อาหารด้วยการเคลื่อนย้ายจากดินสู่พืช พืชผักทุกชนิดดูดซับตะกั่วได้ โดยพืชแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการสะสมตะกั่วที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับกลไกและความสามารถในการสะสมตะกั่วของพืชชนิดนั้น ๆ และเมื่อมนุษย์บริโภคพืชผักก็ได้รับตะกั่วเข้าไปสะสมไว้ในร่างกาย ซึ่งจะมีผลต่อเซลล์และเนื้อเยื่อต่าง ๆ ทำให้เป็นพิษและอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ ถ้าความเข้มข้นของตะกั่วที่ร่างกายได้รับไม่มาก ตะกั่วจะไม่แสดงความเป็นพิษต่อมนุษย์ในทันทีทันใด แต่ตะกั่วจะสะสมอยู่ในร่างกายรอจนถึงจุดอิ่มตัวก็จะแสดงความเป็นพิษ

ออกมา ดังนั้น Gain Report Number: CH14058 [1] จึงกำหนดพืชที่จะนำมาบริโภคว่ามีตะกั่วได้ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักแห้ง และ SEPA [2] กำหนดความเข้มข้นของตะกั่วในเมล็ดธัญพืชสำหรับใช้บริโภคเป็นอาหารมนุษย์ โดยกำหนดไว้ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักแห้ง

การปนเปื้อนตะกั่วในสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของประเทศไทยอยู่ในพื้นที่บ้านคลิตี้ (ทุ่งเสือโทน) อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี เป็นแหล่งชุมชนที่มีวิถีชีวิตเป็นสังคมเกษตรกรรมเพื่อการยังชีพ เพาะปลูกข้าว ข้าวโพด เครื่องเทศ ผักสวนครัว เช่น กะเพรา คื่นช่าย พริก ต้นหอม ผักชี หัวไชเท้า ฯลฯ ไร่บริโภคภายในครัวเรือน โดยอาศัยน้ำจากลำห้วยคลิตี้ในการเพาะปลูก อุปโภค และบริโภค เนื่องจากหมู่บ้านคลิตี้ตั้งอยู่ใกล้กับโรงแต่งแร่ตะกั่วของบริษัทตะกั่วคอนเซนเตรทส์ (ประเทศไทย) จำกัด ดำเนินกิจการเหมืองแร่ตะกั่ว โดยบ่อแต่งแร่ตะกั่วเกิดการรั่วไหลเข้าสู่แหล่งน้ำในปี พ.ศ. 2541 และปนเปื้อนอยู่ในดินปริมาณมาก [3] ซึ่งทำให้เกิดการสะสมในดินและตะกอนดิน ทำให้ปนเปื้อนในน้ำอุปโภค บริโภค และก่อให้เกิดการสะสมในพืชที่ชาวบ้านเพาะปลูก เมื่อได้รับการบริโภคพืชเหล่านี้จะทำให้ได้รับตะกั่วเข้าไปสะสมในร่างกาย ทำให้เกิดอันตราย อาจพิการหรือเสียชีวิตได้ การจัดการตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินมีหลายวิธี เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) การเผาไหม้ (incineration) การระเหย (volatilization) การดูดซับโดยใช้ความร้อน (thermal absorption) และการใช้วิธีทางชีวภาพ (biological techniques) [4] แต่วิธีดังกล่าวค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายสูง จึงได้มีการบำบัดดินที่ปนเปื้อนตะกั่วโดยการใช้พืช (phytoremediation) ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

การศึกษานี้เลือกใช้พริก คื่นช่าย และหัวไชเท้า

ในการทดลองสะสมตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน ซึ่งพริก คื่นช่าย และหัวไชเท้าเป็นพืชสวนครัวที่นิยมรับประทานกันทั่วไป และสามารถเพาะปลูกได้ตลอดปี มีสรรพคุณบำรุงร่างกายและมีประโยชน์มากมาย อีกทั้งยังเป็นพืชเศรษฐกิจที่ทำรายได้ให้กับเกษตรกร ดังนั้นการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเข้มข้นการสะสมตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของพริก คื่นช่าย และหัวไชเท้า และศึกษาประสิทธิภาพของพริก คื่นช่าย และหัวไชเท้าในการดูดซับตะกั่ว เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกบริโภคอย่างปลอดภัย และป้องกันความเสี่ยงอันเนื่องจากการสะสมตะกั่วที่อาจมีปริมาณสูงในพืชผักต่อการบริโภค ทำให้ประชาชนได้บริโภคอาหารที่ปลอดภัยจากสารพิษ

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเก็บตัวอย่างดินปนเปื้อนตะกั่วและดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว

เก็บตัวอย่างดินปนเปื้อนตะกั่วบริเวณบ้านคลิตี้ ตำบลชะแล อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี และดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วบริเวณสถาบันวิจัยและพัฒนากำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม โดยเก็บตัวอย่างดินที่มีความลึก 0-20 เซนติเมตร นำตัวอย่างดินที่ได้มาผึ่งให้แห้งเป็นเวลา 2 สัปดาห์ และทุบให้มีขนาดเล็ก เลือกเศษพืชออกให้หมด คลุกเคล้าให้ทั่ว จากนั้นชั่งตัวอย่างดินใส่กระถางพลาสติก กระถางละ 10 กิโลกรัม และรองด้วยถาดรองกระถางพลาสติกทุกกระถาง

2.2 วิธีการปลูกพริก คื่นช่าย และหัวไชเท้า

ทดลองในโรงเรือน โดยหยอดเมล็ดพริก คื่นช่าย และหัวไชเท้าในกระถาง กระถางละ 3 เมล็ด รดน้ำ วันละ 2 ครั้ง โดยพืชแต่ละกระถางจะได้รับปริมาณน้ำที่เท่ากัน เมื่อต้นกล้าอายุได้ 2-3 สัปดาห์ จึงเลือกต้นกล้าที่มีขนาดความสูงใกล้เคียงกัน แล้วถอนแยกให้เหลือกระถางละ 1 ต้น พริกจะเก็บเกี่ยวที่อายุ 90 วัน

คน้ำจะเก็บเกี่ยวที่อายุ 55 วัน และหัวไซเท้าจะเก็บเกี่ยวที่อายุ 90 วัน

2.3 การเตรียมตัวอย่างดินและพืช

2.3.1 การเตรียมตัวอย่างดิน นำตัวอย่างดินไปตากให้แห้ง เป็นเวลา 1 สัปดาห์ นำดินตัวอย่างที่แห้งแล้วมา 100 กรัม บดในโกร่ง (ครกหิน) จนละเอียด แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร วัดค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน (pH) ด้วย pH meter ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (electrical conductivity, EC) ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (organic matter) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available phosphorus) วัดปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable potassium) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity, CEC)

2.3.2 การเตรียมตัวอย่างพืช นำพืชแต่ละชนิดมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา แล้วแบ่งเป็น 2-3 ส่วน คือ ส่วนราก ส่วนลำต้นและใบ และส่วนเมล็ด (สำหรับพริก) นำไปผึ่งลมให้แห้ง จากนั้นชั่งน้ำหนักสดและบันทึกข้อมูล และตัดตัวอย่างพืชให้มีขนาดเล็กลงใส่ถุงกระดาษ และนำไปอบในตู้อบลมร้อนเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำออกจากตู้อบลมร้อน จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักแห้งอีกครั้ง [5] พร้อมบันทึกผล นำตัวอย่างแห้งที่ได้มาบดด้วยเครื่องปั่นและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร เก็บตัวอย่างพืชที่ได้ใส่ถุงพลาสติกที่สะอาด

2.4 วิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในดิน (total soil lead)

นำตัวอย่างดินที่ผึ่งจนแห้งสนิทมาบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ชั่งตัวอย่างดิน 0.2 กรัม ใส่ในหลอดทดลองขนาด 75 มิลลิลิตร เติม Conc. HNO₃: Conc. HClO₄ และ Conc. HCl/H₂O (1/10 V/V) อัตราส่วน 15:2:15 ปริมาตร 12 มิลลิลิตร จากนั้นนำหลอดทดลองใส่ใน hot-block digestion

ภายใต้ fume hood ที่อุณหภูมิในช่วง 200 องศาเซลเซียส ย่อยสลายตัวอย่างจนได้สารละลายใส ย้ายหลอดทดลองมาวางในตะแกรงวางหลอดทดลองแล้วทิ้งไว้ให้เย็น กรองสารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง Whatman® No. 42 ใส่ลงใน volumetric flask ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาณจนถึงขีดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำสารละลายที่ได้ใส่ขวดพลาสติกขนาด 60 มิลลิลิตร ปิดฝาให้สนิท (ทำ blank ไปพร้อมกับตัวอย่าง) เมื่อได้สารละลายใสที่ผ่านการกรองเรียบร้อยแล้ว นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วโดยใช้เครื่อง graphite atomic absorption spectrophotometry (GAAS)

2.5 วิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในพืช (total plant lead)

นำตัวอย่างพืชที่ผ่านการอบไปปั่นด้วยเครื่องปั่นตัวอย่างพืชจนละเอียด แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร จากนั้นชั่งตัวอย่างพืช 0.2 กรัม ใส่ในหลอดทดลองขนาด 75 มิลลิลิตร เติม Conc. HNO₃ และ Conc. HClO₄ อัตราส่วน 5:1 ปริมาตร 12 มิลลิลิตร แล้วนำหลอดทดลองไปใส่ใน hot-block digestion ภายใต้ fume hood ที่อุณหภูมิในช่วง 200 องศาเซลเซียส ย่อยสลายตัวอย่างจนได้สารละลายใส ย้ายหลอดทดลองมาวางในตะแกรงวางหลอดทดลองแล้วทิ้งไว้ให้เย็น และปรับปริมาณใน volumetric flask ให้ได้ 50 มิลลิลิตร จนถึงขีดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำสารละลายที่ได้ใส่ขวดพลาสติกขนาด 60 มิลลิลิตร ปิดฝาให้สนิท (ทำ blank ไปพร้อมกับตัวอย่าง) เมื่อได้สารละลายใสแล้ว นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วด้วยเครื่อง graphite atomic absorption spectrophotometry (GAAS)

2.6 การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD,

completely randomized design) 2 ชุดการทดลอง แต่ละชุดการทดลองมี 3 ซ้ำ ผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS 15.0 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p \leq 0.05$) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของชุดการทดลองด้วยวิธี Student's t test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p \leq 0.05$)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 การเจริญเติบโต

3.1.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีบางประการของดินที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วเก็บจากด้านหลังสถาบันวิจัยและพัฒนากำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม และดินปนเปื้อนตะกั่วของบ้านคลิตี้ ตำบลชะแล อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดกาญจนบุรี โดยก่อนการทดลองนำตัวอย่างดินทั้ง 2 ชนิด มาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน แสดงดังตารางที่ 1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินไม่ปนเปื้อนและดินปนเปื้อนตะกั่ว พบว่าดินไม่ปนเปื้อนเป็นดินเหนียว (clay loam) ประกอบด้วย sand 35.72 % silt 36.92 % และ clay 27.36 % ส่วนดินปนเปื้อนตะกั่วจัดเป็นดินเหนียว (clay loam) ประกอบด้วย sand 24.14 % silt 48.71 % และ clay 27.15 % ค่า pH ของดินไม่ปนเปื้อนมีค่า 6.69 (pH 6.6-7.3) มีสภาพเป็นกลางเช่นเดียวกับดินปนเปื้อนมีค่า pH 7.26 ซึ่งตะกั่วในดินส่วนใหญ่พืชไม่สามารถดูดซับ เพราะอยู่ในรูปที่ไม่ละลาย นอกจากดินมีสภาพความเป็นกรดสูง ซึ่งมีค่า pH 5.1 ถึง < 4.5 [6] สอดคล้องกับ พืชิต และคณะ [7] ที่ศึกษาการดูดซับของตะกั่วในดิน พบว่าปริมาณตะกั่วที่ดูดซับในดินมีความสัมพันธ์กับค่า pH ของดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยปริมาณตะกั่วที่ดูดซับจะมีปริมาณมากขึ้นเมื่อดินมีค่า pH สูงขึ้น ซึ่งดินที่มีปริมาณ

ตะกั่วที่ดูดซับมาก ทำให้ปริมาณตะกั่วในสารละลายดินลดลง ส่งผลให้ความเป็นพิษของตะกั่วในดินลดลงด้วย ดังนั้น pH ของดิน จึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ควบคุมการดูดซับและปลดปล่อยตะกั่วในดิน สำหรับการดูดซับและปลดปล่อยตะกั่วในดิน สำหรับดินไม่ปนเปื้อนและดินปนเปื้อนตะกั่วมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง 4.30 และ 5.64 % ตามลำดับ โดย Sharma และคณะ [8] กล่าวว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินจะช่วยลดความเป็นประโยชน์ของโลหะหนักในดิน เนื่องจากอินทรีย์วัตถุสามารถจับยึดโลหะหนักไว้ โดยโลหะหนักจะสะสมอยู่ในอินทรีย์วัตถุ ทำให้พืชสามารถดูดซับตะกั่วได้น้อยลง สำหรับค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินปนเปื้อนตะกั่ว (CEC) มีค่า 13.96 เซนติโมลต่อกิโลกรัม โดยค่า CEC แสดงให้เห็นว่าปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่คอลลอยด์หรือดินดูดซับไว้ได้มีค่าปานกลาง ทำให้ตะกั่วในดินอยู่ในรูปไม่ละลายมากขึ้น ส่งผลให้พืชดูดซับตะกั่วจากดินได้ลดลง ซึ่งผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Businelli และคณะ [9] ที่ศึกษาปัจจัยเกี่ยวกับการดูดซับตะกั่วในพืชผักรับประทานผลในเขตเกษตรกรรมของประเทศอิตาลี พบว่าพื้นที่ที่มีค่า CEC สูง 36.9 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทำให้พืชผักรับประทานผลมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ที่มีค่า CEC ต่ำ (2.9 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) ดังนั้นค่าสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินมีผลต่อการดูดซับตะกั่วของพืช โดยพืชจะดูดซับตะกั่วได้มากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสภาพการละลายได้ของตะกั่วในดิน สำหรับดินที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกต่ำ มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินน้อย และมีสภาพกรดจัดย่อมเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ตะกั่วในดินละลายได้มากขึ้น อีกทั้งระดับความเป็นพิษของตะกั่วในพืชชนิดหนึ่ง ๆ ยังขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยพืชที่ปลูกในดินที่มีธาตุอาหารครบสามารถทนต่อระดับตะกั่วในปริมาณที่สูงกว่า เมื่อปลูกในดินที่ขาดธาตุ

อาหาร [6] และเมื่อนำความเข้มข้นตะกั่วในดินปนเปื้อนตะกั่วเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานการปนเปื้อนตะกั่วในดินเกษตรกรรมของประเทศไทย

พบว่าดินปนเปื้อนตะกั่วก่อนและหลังการทดลองมีปริมาณความเข้มข้นตะกั่วสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม [10]

Table 1 Physical and chemical characteristics of the experimental soil.

Soil properties	Analytical values	
	Control	Treatment
Texture	Clay loam	Clay loam
pH	6.69	7.26
EC (dS/m)	7.20	3.95
Organic matter (%)	4.30	5.64
Available P (mg/Kg)	300.31	58.91
Exchangeable K (mg/Kg)	1203.6	136.99
CEC (cmol/Kg)	7.75	13.96
Total soil Pb (beginning)	103.18	1979.64

3.1.2 การเจริญเติบโตของพริก ค่ะน้ำ และหัวไชเท้า

การเจริญเติบโตของพริกที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนตะกั่ว นั้นจะพิจารณาจากความสูง น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง ผลที่ได้จากการทดลองเห็นว่าทั้งพริกที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและดินปนเปื้อนตะกั่วมีความสูงที่ไม่ต่างกัน (รูปที่ 1) แต่สังเกตว่าค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตของรากและลำต้นของพริกที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีค่ามากกว่าพริกที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว กล่าวคือ ตะกั่วมีความเป็นพิษหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของพริก ทำให้ค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตของรากและลำต้นลดลง โดยศุภมาศ [6] กล่าวว่าค่าวิกฤติของตะกั่วที่เริ่มยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชมีค่า 100-400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งสอดคล้องกับ Opeolu และคณะ [11] ซึ่งศึกษาในมะเขือเทศ (*Lycopersicon esculentum*) ที่ปลูกใน

ดินที่รดด้วยสารละลายเลด (II) ไนเตรต $Pb(NO_3)_2$ พบว่าที่ระดับความเข้มข้น 1,800 ppm ทำให้การเจริญเติบโตทางกายภาพของมะเขือเทศลดลง ผลการทดลองพบว่าคะน้ำที่เจริญเติบโตในดินไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนตะกั่วมีความสูงไม่ต่างกัน (รูปที่ 1) สอดคล้องกับ Ullah และคณะ [12] ที่ศึกษาการสะสมโลหะหนักโดยทานตะวันที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก 3 ชนิด คือ ตะกั่ว โครเมียม และแคดเมียม พบว่าทานตะวันที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว 3 ระดับความเข้มข้น คือ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีความสูงไม่ต่างกัน การเจริญเติบโตของหัวไชเท้าที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วและดินปนเปื้อนตะกั่ว เมื่อพิจารณาความสูงพบว่าหัวไชเท้าที่เจริญเติบโตในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วและดินปนเปื้อนตะกั่วมีค่าเฉลี่ยความยาวรากและค่าเฉลี่ยความสูงของส่วนเหนือดินไม่แตกต่างกันทางสถิติ (รูปที่ 1)

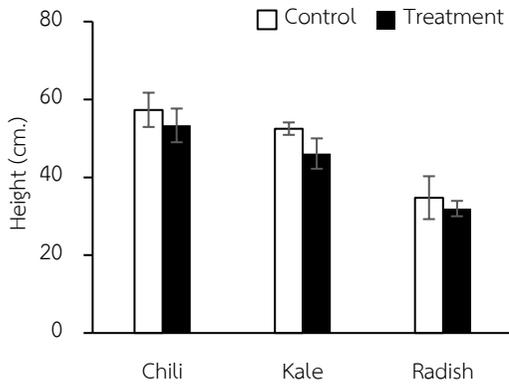


Figure 1 Height of chili, kale and radish in control and treatment (p > 0.05)

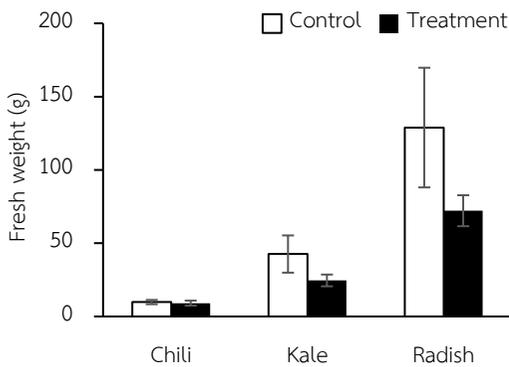


Figure 2 Fresh weight of chili, kale and radish in control and treatment (p > 0.05)

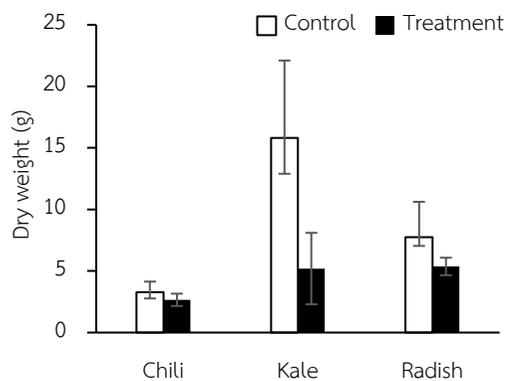


Figure 3 Dry weight of chili, kale and radish in control and treatment (p > 0.05)

ด้านน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของพริก และคะน้า พบว่าพริกและคะน้าที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนตะกั่วมีการสะสมน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งใกล้เคียงกัน (รูปที่ 2 และ 3) เป็นเพราะในดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่วมีปริมาณอินทรีย์วัตถุและความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) สูงกว่าดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ดังนั้นในดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว ตะกั่วมีโอกาสในการสร้างพันธะกับอินทรีย์วัตถุในดิน ส่งผลให้ตะกั่วในดินถูกตรึงเอาไว้ พืชที่เจริญเติบโตในดินเหล่านี้จึงสามารถดูดดึงตะกั่วเข้ามาสะสมในส่วนต่าง ๆ ลดลง ส่งผลให้ความเป็นพิษของตะกั่วที่มีต่อพืชลดลง แต่การทดลองนั้นแม้ว่าการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าพริกและคะน้าที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนตะกั่วมีการสะสมน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (รูปที่ 2 และ 3) แต่สังเกตได้ว่าพืชที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนจะมีปริมาณน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งสูงกว่าพืชที่ปลูกในดินปนเปื้อนเล็กน้อย อาจเพราะตะกั่วมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยจะส่งผลในการลดปริมาณคลอโรฟิลล์และจำนวนกรานา (grana) ในคลอโรพลาสต์ ทำให้กระบวนการทำงานระดับเซลล์ผิดปกติ การเจริญเติบโตของพืชจึงลดลง [13] ซึ่ง Zou และคณะ [14] ศึกษาการสะสมตะกั่วและศักยภาพในการ phytostabilization ของชนิดพืชที่เติบโตในเมืองแร่ตะกั่วและสังกะสี พบว่าชีวมวลของพืชที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีปริมาณต่ำกว่าชีวมวลของพืชที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว เช่นเดียวกับ Jing และคณะ [15] ที่ศึกษาผลของแคดเมียมต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ 2 สายพันธุ์ ได้แก่ Hezuo 903 และ Jiangshu 14 ในระยะต้นกล้า พบว่าระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศทั้ง 2 สายพันธุ์ โดยน้ำหนักแห้งของราก ลำต้น และใบมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม การเจริญเติบโตของหัวไชเท้าที่ปลูกในดิน

ไม่ปนเปื้อนตะกั่วและดินปนเปื้อนตะกั่วในส่วนของน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง ผลการทดลองซึ่งเห็นได้ว่า หัวไชเท้าที่เจริญเติบโตในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วและดินปนเปื้อนตะกั่วมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งใกล้เคียงกัน ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่จะพบว่าในส่วนของรากของหัวไชเท้าที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วจะมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งต่ำกว่าหัวไชเท้าที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วเล็กน้อย (รูปที่ 2 และ 3)

3.2 ความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของพริก คื่นฉ่าย และหัวไชเท้า

การศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักต่าง ๆ ของพริก คื่นฉ่าย และหัวไชเท้า พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณราก [16] และมีการเคลื่อนย้ายขึ้นมายาสมรสในส่วนต่าง ๆ ของพืชได้ปริมาณไม่มากนัก เนื่องจากโลหะหนักซึ่งส่วนใหญ่มีประจุบวกสามารถสร้างพันธะกับผนังเซลล์ของพืชซึ่งมีโครงสร้างผนังเซลล์เป็นประจุลบได้ดี อีกทั้งการเคลื่อนที่ของโลหะหนักผ่านระบบท่อลำเลียงในพืชที่เป็นไปได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากระบบท่อลำเลียงน้ำและอาหารของพืชมีแวนโตเดอริสและแคปพาเรียนสติปกั้นอยู่ ทำให้การเคลื่อนที่ผ่านขึ้นไปสู่ส่วนเหนือดินเกิดขึ้นได้ยาก สอดคล้องกับการศึกษาของ Sinegani และ Khalilikah [17] ที่พบว่าความเข้มข้นของตะกั่วในรากพืชมีความเข้มข้นสูงกว่าในส่วนอื่น ๆ โดยทั่วไปความเข้มข้นของตะกั่วในเนื้อเยื่อพืชจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่ม EDTA ลงไปในการทดลอง

การทดลองพบว่าพริก คื่นฉ่าย และหัวไชเท้า มีปริมาณการสะสมตะกั่วสูงสุด คือ ราก รองลงมา คือ ส่วนเหนือดิน เนื่องมาจากตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่จากดินเข้าสู่ต้นพืชได้น้อย จึงทำให้ตะกั่วมีการสะสมอยู่บริเวณรากได้มากกว่าส่วนเหนือดินและเมล็ด (ตารางที่ 2) โดยผลการศึกษา สอดคล้องกับงานวิจัยของ Angelova และคณะ [18]

ที่ศึกษาการสะสมตะกั่วในพืชผักวงศ์ Solanaceae ได้แก่ มะเขือเทศ พริก และมะเขือม่วง พบว่าพืชทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณการสะสมตะกั่วในรากมากกว่าลำต้นและใบ เช่นเดียวกับ Namati และคณะ [19] ที่ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของมะเขือเทศ (*Lycopersicon esculentum*) ซึ่งปลูกในดินที่มีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วสูงสุด 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่าปริมาณการสะสมตะกั่วสูงสุดคือ ราก รองลงมา คือ ลำต้นและใบ มีค่า 61.235 และ 55.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เห็นได้ว่าความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของพืช มักพบการสะสมได้สูงสุดในราก [20] ส่วน Angelova และคณะ [18] ทดสอบการสะสมและการกระจายตัวของตะกั่วของพืชตระกูล Solanaceae ที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักในบริเวณเขตอุตสาหกรรม ประเทศบัลแกเรีย โดยเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร และ 20-40 เซนติเมตร ห่างจากแหล่งกำเนิดมลพิษ 0.1 และ 15 กิโลเมตร ซึ่งวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วทั้งหมด (total lead) ด้วยเครื่อง inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES) พบว่าระยะทางของแหล่งกำเนิดมลพิษและระดับความลึกของชั้นดิน มีผลต่อปริมาณการสะสมของตะกั่ว ซึ่งระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร ที่ระยะทาง 0.1 กิโลเมตร มีปริมาณการสะสมของตะกั่วทั้งหมดมากที่สุด 913.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สอดคล้องกับปริมาณการสะสมตะกั่วในมะเขือเทศ พริก และมะเขือม่วง โดยพบปริมาณการสะสมตะกั่วมากที่สุดคือ ราก รองลงมาคือ ลำต้นและใบ Finster และคณะ [21] ได้ศึกษาปริมาณการสะสมตะกั่วในพืชผักที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว พบว่าพืชผักที่รับประทานผลมีการสะสมตะกั่วที่ส่วนต่าง ๆ ของพืชแตกต่างกัน ซึ่งมะเขือเทศที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว 3,470 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบการสะสมตะกั่วในส่วนราก 715 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ใน

ส่วนยอด 22 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับพริกแดงที่ปลูกในดินปนเปื้อน 1,700 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบการสะสมตะกั่วในส่วนรากมากกว่ายอด

การสะสมตะกั่วในเมล็ดของพริก (ตารางที่ 2) พริกมีการสะสมตะกั่วเกินค่ามาตรฐานที่จะนำมาใช้เป็นอาหารมนุษย์ ซึ่งความเข้มข้นของตะกั่วในพืชที่ยอมรับได้ตามเกณฑ์ Gain Report Number: CH14058 กำหนดให้มีได้ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนค่าที่ยอมรับได้สำหรับใช้เป็นอาหารสำหรับเลี้ยงสัตว์ คือ ไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) [22] โดยการทดลองพบว่าพริกที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีการสะสมตะกั่วในเมล็ดเฉลี่ยสูงถึง 30.16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานกว่า 30 เท่า สอดคล้องกับการศึกษาการสะสมโลหะหนักบริเวณเขตอุตสาหกรรม โดยเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร ห่างจากโรงหลอมโลหะหนักที่ระยะ 0.5 และ 15 กิโลเมตร ทดสอบในพืชวงศ์ Solanaceae ได้แก่ มะเขือเทศ (*Lycopersicon esculentum*) มะเขือยาว (*Solanum melongena* L.) และพริก (*Capsicum annum* L.) พบว่าระดับการปนเปื้อนในดินขึ้นอยู่กับระยะทางของแหล่งกำเนิด ซึ่งระดับการปนเปื้อนสูงสุด 630 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ของตะกั่ว 13.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ของแคดเมียม 60.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ของทองแดง และ 974 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ของสังกะสี ส่วนการสะสมโลหะหนักมีความแตกต่างกัน ซึ่งมะเขือเทศมีปริมาณการสะสมโลหะหนักมากที่สุด ส่วนพริกสะสมมากในเมล็ดและมะเขือยาวสะสมมากที่สุด การทดลองนี้สามารถสรุปว่าไม่ควรปลูกมะเขือเทศ พริก และมะเขือยาว ในเขตพื้นที่อุตสาหกรรม เพราะพืชทั้ง 3 ชนิด นี้มีการสะสมปริมาณโลหะหนักอย่างมีนัยสำคัญ อาจเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค สอดคล้องกับ ธงชัย และคณะ [23] ที่ศึกษาปริมาณและการดูดซึมของตะกั่วในดินเพาะปลูกและผักสวนครัว ได้แก่ ตะไคร้ ข่า เผือก กระเพรา พริกขี้หนู และมะเขือ ที่เพาะปลูกในหมู่บ้านคลิตี้บนและคลิตี้ล่าง ตำบลชะแล อำเภอลำปาง จังหวัดกาญจนบุรี โดยวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วจากส่วนที่รับประทานได้ของผักสวนครัวแต่ละชนิด พบว่าผักสวนครัวเกือบทุกชนิดมีปริมาณการสะสมตะกั่วเกินค่ามาตรฐาน ยกเว้นกระเพรา ซึ่งปริมาณตะกั่วในผลมะเขือและผลพริกขี้หนูพบตะกั่ว 2.2-7.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 1.16-27.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

Table 2 Lead concentration in various parts of chili, kale and radish (mg/kg DW)

	Plants	Root	Shoot	Seed
Control	chili	32.20±13.46	30.59±13.84	25.27±5.77
	kale	36.69±9.64	23.59±4.44	
	radish	60.22±8.17	39.07±6.08	
Treatment	chili	52.42±9.59	37.48±11.38	30.16±11.50
	kale	51.62±4.95	38.19±8.14	
	radish	49.20±0.54	35.59±4.03	

Mean ± SD

3.3 ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายตะกั่ว

3.3.1 ปัจจัยความเข้มข้นชีวภาพ

ปัจจัยความเข้มข้นชีวภาพ (bio-concentration factor, BCF) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการศึกษาการสะสมและการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก [16] โดยชนิดพืชที่สมควรนำมาพิจารณาเพื่อใช้ในการบำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักควรมีค่า BCF มากกว่า 1 การทดลองพบว่าพริก คื่นฉ่าย และหัวไชเท้าที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีค่า BCF แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ค่าความเข้มข้นชีวภาพสูงสุดพบในพริกที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีค่า 0.05 ± 0.06 คื่นฉ่ายที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายตะกั่วเข้าสู่พืชเฉลี่ย 0.08 ± 0.02 หัวไชเท้าที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีค่าความเข้มข้นชีวภาพเฉลี่ย 0.05 ± 0.01 ซึ่งพืชทุกชนิดมีค่า BCF น้อยกว่า 1 ดังนั้นพริก คื่นฉ่าย และหัวไชเท้าในการทดลองนี้ไม่มีประสิทธิภาพในการใช้เป็นเครื่องมือบำบัดตะกั่วในดินปนเปื้อนตะกั่วบ้านคลิตี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ฐิตาภา [24] กับ Davila และคณะ [25] ที่ศึกษาเกี่ยวกับการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินและพืชจากพื้นที่การเกษตร สรุปว่าค่าปัจจัยความเข้มข้นชีวภาพของข้าวโพดมีค่าต่ำกว่า 1 ดังนั้นข้าวโพดในการทดลองนั้นไม่ควรนำมาใช้เป็นพืชในการบำบัดตะกั่วในพื้นที่

ปนเปื้อน และ Chandra และคณะ [26] ที่ศึกษาการสะสมและการกระจายของโลหะในข้าวสาลีและผักกาดเขียวที่ได้รับน้ำเสียจากโรงงานต้มสุราและโรงงานฟอกหนัง พบว่าในข้าวสาลีมีค่า BCF น้อยกว่า 1 แต่ผักกาดเขียวมีค่ามากกว่า 1 กล่าวคือ ข้าวสาลีไม่เหมาะสมในการบำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนตะกั่วในความเข้มข้นสูง

3.3.2 การเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากสู่ส่วนเหนือดินของพืช

การเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากเข้าสู่ส่วนเหนือดินของพืช (translocation factor, TF) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของพืชในการเคลื่อนย้ายตะกั่วขึ้นมาสะสมในส่วนที่สามารถเก็บเกี่ยวได้สะดวก (harvestable part) [16] ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่า TF ของพริก คื่นฉ่าย และหัวไชเท้าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 3) การทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยปัจจัยการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากสู่ส่วนเหนือดินของพืชในการทดลองมีค่ามากกว่า 1 โดยพบอยู่ในพริกที่ปลูกในดินปนเปื้อนมีค่า 1.32 ± 0.31 ดังนั้นพริกที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วจากบ้านคลิตี้มีความสามารถในการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากไปสู่ส่วนเหนือดินสูง อาจเป็นผลมาจากตะกั่วสามารถเคลื่อนย้ายผ่าน xylem และ phloem [27] สอดคล้องกับ สายชล [28] ที่รายงานว่าทานตะวันหลังปลูกที่ระยะ 8 สัปดาห์พบว่าที่ค่า TF สูงกว่าพริกหลังปลูกที่ระยะ 4 และ 6

Table 3 Bioconcentration factor and translocation factor

	Plants	Bioconcentration factor	Translocation factor
Control	chili	0.04±0.06	2.04±0.43
	kale	1.18±0.23	0.69±0.30
	radish	2.43±0.29	0.65±0.06
Treatment	chili	0.05±0.06	1.32±0.31
	kale	0.08±0.02	0.73±0.09
	radish	0.05±0.01	0.72±0.08

สปีดาร์ และค่า TF ที่ได้มีค่าสูงกว่า 1 กล่าวคือ ทานตะวันมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายตะกั่วมาสะสมในส่วนเหนือดินดี ซึ่ง Ogunkunle และคณะ [29] กล่าวว่าค่า TF ที่มีค่าสูง คือ มากกว่า 1 เป็นผลมาจากค่าพีเอชของดินที่มีค่าต่ำลง แต่ถ้าค่าพีเอชดินสูงสามารถตรึงหรือลดการชะล้างของโลหะ อีกทั้งขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและพื้นที่ที่ปนเปื้อนโลหะ และควรหลีกเลี่ยงการบริโภคพืชผักที่มีค่า TF มากกว่า 1 เพื่อลดความเสี่ยงต่อสุขภาพ

3.3.3 ค่าดัชนีการทนทานต่อสารพิษ

ค่าดัชนีการทนทานต่อสารพิษ (TI, tolerance index) เป็นค่าดัชนีที่แสดงความทนทานของพืชที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว โดยพืชที่มีความทนทานต่อตะกั่วได้สูงต้องมีค่า TI มากกว่า 1 [30] เมื่อคำนวณค่าดัชนีในการทนทานต่อสารพิษของพริกพบว่า มีค่า TI 1.23 แสดงให้เห็นว่าพริกมีความทนทานต่อตะกั่ว (ตารางที่ 4) ค่าดัชนีในการทนทานต่อสารพิษของคะน้าเฉลี่ย พบว่ามีค่า TI 0.33 ค่าดัชนีการทนทานต่อสารพิษของหัวไชเท้าที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วพบว่า มีค่าเฉลี่ย TI 1.32 แสดงว่าหัวไชเท้ามีความทนทานต่อตะกั่ว แสดงดังตารางที่ 4 ค่า TI นี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงการอยู่รอดของพืชในสภาวะมีความเข้มข้นของโลหะสูง ซึ่งอาจยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช [31] โดยพืชแต่ละชนิดนั้นมีความสามารถในการสะสมโลหะและมีความทนทานต่อโลหะหนักที่ต่างกัน ข้อมูลที่ได้นี้บ่งบอกถึงการเจริญเติบโตของพริกที่มีค่า TI 1.23 เช่นเดียวกับหัวไชเท้าที่มีค่า TI 1.32 แสดงให้เห็นว่าพริกและหัวไชเท้ามีความทนทานต่อตะกั่ว โดย Clemens [32] กล่าวว่าความทนทานของพืชขึ้นอยู่กับความทนทานของกระบวนการดูดดึงโลหะหนัก และการแบ่งสะสมโลหะหนักในส่วนต่าง ๆ ของพืช ซึ่งพืชที่มีปริมาณชีวมวลสูง สามารถช่วยลดความเข้มข้นของโลหะหนักภายในเนื้อเยื่อของพืช ส่วนพืชมีการสร้าง

กลไกที่จะควบคุมความเป็นพิษของโลหะหนัก ซึ่งกลไกที่มีประสิทธิภาพในการจับโลหะหนักได้ดีในเซลล์พืชคือ phytochelatin (PC) และ metallothionein (MT) กระบวนการสังเคราะห์ PC เกิดจากการสร้างสารประกอบระหว่าง phytochelatin ซึ่งเป็นเพปไทด์ที่มีโครงสร้าง $(\gamma\text{-Glu-Cys})_n\text{X}$ เมื่อ Glu และ Cys คือ กรดอะมิโนกลูตามีนและซิสเทอีน ตามลำดับ n คือ จำนวนหน่วย ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 2-11 หน่วย และ X โดยส่วนมาก คือ กรดอะมิโนไกลซีน การเคลื่อนระหว่างเพปไทด์ดังกล่าวและโลหะหนักเป็นกลไกที่ช่วยในการลำเลียงสารประกอบ คีเลตเพปไทด์และโลหะหนักเหล่านี้เข้าสู่แวคิวโอของพืช [33] ส่วนการสร้างสารประกอบระหว่างโลหะหนักกับเมทัลโลไธโอนีน (metallothioneine) จัดเป็นกลุ่มของโปรตีนขนาดเล็กที่มีองค์ประกอบของกรดอะมิโนซิสเทอีน (cysteine) ปริมาณสูง มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งกลไกนี้เกิดได้ดีกับโลหะที่มีประจุบวก ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี ทองแดง เป็นต้น กลไกการสร้างสารประกอบระหว่างโลหะหนักกับเมทัลโลไธโอนีนนี้ พบว่าทำให้พืชสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณที่สูง และช่วยให้พืชสามารถต้านทานความเป็นพิษของโลหะหนักที่ความเข้มข้นสูง ๆ นอกจากนี้ยังพบว่าการสร้างสารประกอบชนิดนี้มีความเกี่ยวข้องกับการสร้างสารประกอบกลูตาไธโอน (glutathione) เป็นกลไกการลำเลียงสารประกอบนั้น ๆ เพื่อกักเก็บไว้ในแวคิวโอของพืช [33,34] กลไกทั้ง 2 กลไก ที่กล่าวมาข้างต้น ส่งผลให้พืชมีความทนทานต่อความเป็นพิษของโลหะหนักมากขึ้น จึงทำให้พืชสามารถเจริญเติบโตได้ในบริเวณที่มีปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่สูง ส่วนคะน้ามีค่า TI 0.33 (ตารางที่ 4) จากข้อมูลนี้บ่งบอกถึงการเจริญเติบโตของคะน้าที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่ำ โดยพืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการสะสมโลหะและมีความทนทานต่อโลหะหนักที่ต่างกัน

โดยพบว่าพืชในตระกูล *Brassica* spp. มีความสามารถในการสะสมและสามารถเจริญเติบโตในสภาพพื้นที่ที่มีโลหะหนักปนเปื้อนดี [35]

Table 4 Tolerance index of chili, kale and radish

Plants	Tolerance index
chili	1.23
kale	0.33
radish	1.32

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการเจริญเติบโตของพริก คื่นช่าย และ หัวไชเท้า ที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนตะกั่ว นั้นมีการเจริญเติบโตใกล้เคียงกัน โดยความสูง น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของพืชทุกชนิดที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนตะกั่วมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของพริก คื่นช่าย และ หัวไชเท้า ทั้งประเภทที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนตะกั่ว พบว่าตะกั่วจะมีการสะสมในรากสูงที่สุด รองลงมา คือ ส่วนเหนือดิน และเมล็ดตามลำดับ ความเข้มข้นตะกั่วในเมล็ดของพริก ส่วนลำต้นและใบของคื่นช่าย และส่วนรากของหัวไชเท้าในดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว มีความเข้มข้นตะกั่วเกินมาตรฐานสำหรับการบริโภคเป็นอาหารมนุษย์ (0.1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) และโดยเฉลี่ยแล้วเกินค่ามาตรฐานของการใช้เพื่อเป็นอาหารสัตว์ (30 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) ในส่วนประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายตะกั่วเข้าสู่พืช (BCF) พริก คื่นช่าย และ หัวไชเท้า ที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีค่าน้อยกว่า 1 ดังนั้นพริก คื่นช่าย และ หัวไชเท้า ในการทดลองนี้ไม่มีประสิทธิภาพในการใช้เป็นเครื่องมือบำบัดตะกั่วในดินปนเปื้อน ส่วนปัจจัยการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากสู่ส่วนเหนือดินของพืช (TF) มีค่ามากกว่า 1 ดังนั้นพริกที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีความสามารถ

ในการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากไปสู่ส่วนเหนือดินสูง ควรหลีกเลี่ยงการบริโภคเพื่อลดความเสี่ยงต่อสุขภาพ ส่วนคื่นช่ายและหัวไชเท้ามีค่า TF น้อยกว่า 1 แสดงว่าการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากสู่ส่วนเหนือดินของพืชไม่ดี ตะกั่วจะสะสมอยู่ในรากมาก จึงแนะนำว่าไม่ควรบริโภคหัวไชเท้าที่ใช้ในการทดลองนี้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากหลักสูตรวิทยาศาสตรและเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ประจำปี 2561 และทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2561

6. References

- [1] Gain Report Number: CH14058, 2014, China's Maximum Levels for Contaminants in Foods, pp. 1-19, USDA Foreign Agricultural Service, China.
- [2] SEPA, 2005, Maximum Levels of Contaminant in Food, In GB 2762-2005, State Environmental Protection Administration, Beijing.
- [3] Water Quality Management Bureau, 2009, Environmental quality situation in Huay Klity, In Annual Report, Water Quality Management Bureau 2009, Pollution Control Department, Bangkok. (in Thai)
- [4] Noyes, 1991, Handbook of Pollution Control Process, USA.
- [5] Panich- pat, T. and Srinives, P. , 2009, Partitioning of lead accumulation in rice plant, Thai J. Agric. Sci. 42(1): 35-40.

- [6] Panichsakpatana, S., 1997, Soil Pollution from Chemical Use, Kasetsart University Press, Bangkok, 327 p. (in Thai)
- [7] Pongsakul, P., Attajarusit, S. and Kaeorot, S., 2001, Lead adsorption in soils, Thai J. Soils Fertil. 22: 29-37. (in Thai)
- [8] Sharma, R.K., Madhoolika, A. and Fiona, M., 2006, Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India, J. Ecotoxicol. Environ. Saf. 66: 258-266.
- [9] Businelli, D., Andrea, O. and Luisa, M., 2011, Factors involved in uptake of lead by some edible crops grown in agricultural soil of central Italy, J. Soil Sci. 176: 472-478.
- [10] Pollution Control Department, 2004, Announcement of the National Environment Board No. 25 (2004): Soil Quality Standard, Publish in Royal Thai Government Gazette Vol. 121 (Special 119๓), October 20, 2004. (in Thai)
- [11] Opeolu, B.O., Adenuga, O.O., Ndakidemi, P.A. and Iujimi, O.O., 2010, Assessment of phyto-toxicity potential of lead on tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) plant on contaminated soils, Int. J. Phys. Sci. 5(2): 68-73.
- [12] Ullah, R., Bakht, J., Sahfi, M., Lqbal, M., Khan, A. and Saeed, M., 2011, Phyto accumulation of heavy metal by sunflower (*Helianthus annuus* L.) grown on contaminated soil, Alf. J. Biotechnol. 10: 17192-17198.
- [13] Losch, R. and Koh, K.I., 1999, Plant Respiration Under the Influence of Heavy Metals, pp. 139-156. In Prasad, M.N.V. and Hagemeyer, J. (Eds.), Heavy Metal Stress in Plant, Springer-Varlag, Berlin.
- [14] Zou, T., Li, T., Zhang, X., Yu, H. and Huang, H., 2012, Lead accumulation and phyto stabilization potential of dominant plant species growth in a lead zinc mine tailing, Environ. Earth Sci. 65: 621-630.
- [15] Jing, D., Wu, F.B. and Zhang, G.P., 2005, Effect of cadmium on growth and photosynthesis of tomato seedling, J. Zhejiang Univ. Sci. 10: 974-980.
- [16] Yoon, J., Xinde, C., Qixing, Z. and Lena, Q.M., 2006, Accumulation of Pb, Cu and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site, J. Sci. Total Environ. 368: 456-464.
- [17] Sinegani, A.A.S and Khalilikhah, F., 2008, Phytoremediation of lead by *Helianthus annuus*: Effect of mobilizing agent application time, Plant Soil Environ. 54: 434-440.
- [18] Angelova, V.R., Todor, D. and Krasimir, I.I., 2009, Bioaccumulation and distribution of lead, zinc and cadmium in crops of Solanaceae family, Commun. Soil Sci. Plant Anal. 40: 2248-2263.
- [19] Namati, H., Abdol, A.B. and Yavar, S., 2013, Effects of soil lead (Pb) concentration on some qualitative and quantitative charac

- teristics of *Lycopersicon esculentum*, Int. J. Agron. Plant Prod. 4: 438-441.
- [20] Tiffin, L.O., 1977, The form and distribution of metals in plants: An overview, pp. 315, In Proceeding Hanford Life Sciences Symposium, US. Department of energy, Symposium Series, Washington, D.C.
- [21] Finster, M. E., Kimberly, A. G., Helen, J. B., 2003, Lead levels of edibles grown in contaminated residential soil: A field survey, J. Sci. Total Environ. 320: 245-257.
- [22] Chaney, R.L., Li, Y., Brown, S.L., Homer, F.A., Malik, M., Angle, J.S., Baker, J.M., Reeves, D. and Chin, M., 2000, Improving metal hyperaccumulator wild plants to develop commercial phytoextraction system: Approaches and progress, pp. 129-158, In Terry, N. and Banuelos, G. (Eds.), Phytoremediation of Contaminated Soil and Water, Lewis Public, Washington, D.C.
- [23] Sornpia, T., Ungkanasayun, S., Ninlanon, N. and Sooksamiti, P., 2013, A study of heavy metal content in vegetables and soil from Klity village, Thong Pha Phum district, Kanchanaburi province, In 29th National Graduate Research Conference, Mae Fah Luang University, Chiang Rai. (in Thai)
- [24] Kaewsringam, T., 2014, The Accumulation of Lead in Maize (*Zea mays* L.) and Selection of Bacteria in Lead Contaminated Field at Klity village, Kanchanaburi province, Master Thesis, Kasetsart University, Nakhon Pathom, 105 p. (in Thai)
- [25] Dávila, O.G., Gómez-Bernal, J.M. and Ruiz-Huerta, E.S., 2012, Plants and soil contamination with heavy metals in agricultural areas of Guadalupe, Zacatecas, Mexico, Environ. Contam. 2012: 37-49, DOI: 10.5772/31062.
- [26] Chandra, R., Bharagava, R.N., Yadav, S. and Mohan, D., 2009, Accumulation and distribution of toxic metals in wheat (*Triticum aestivum* L.) and Indian mustard (*Brassica campestris* L.) irrigated with distillery and tannery effluents, J. Hazard Mater. 162: 1514-1521.
- [27] Greger, M., 1999, Metal Availability and Bioconcentration in Plant, pp. 1-28. In Prasad, M.N.V. and Hagemeyer, J. (Eds.), Heavy Metal Stress in Plant, Springer-Varlag, Berlin.
- [28] Sukyankij, S., 2013, Comparison of Sunflower and Sorghum in Absorbing Lead Contaminated Soil from Klity village, Kanchanaburi province, Master Thesis, Kasetsart University, Nakhon Pathom, 64 p. (in Thai)
- [29] Ogunkunle, C.O., Paul, O.F., Olusegun, O.A. and Kehinde, S.O., 2013, Root-shoot partitioning of copper, chromium and zinc in *Lycopersicon esculentum* and *Amaranthus hybridus* grown in cement-polluted soil, J. Environ. Exp. Biol. 11: 131-136.
- [30] Nui, Z.X., Sun, L.N., Sun, T.H., Li, Y.S. and Wang, H., 2007, Evaluation of phyto extracting cadmium and lead by

- sunflower, ricinus, alfalfa and mustard in hydroponic culture, J. Environ. Sci. 19: 961-967.
- [31] Xiang, S., Zhang, X., Chen, G., Chen, Y., Wang, L. and Shan, X., 2011, Seeding growth and metal accumulation of selected woody species in copper and lead/zinc mine tailing, J. Environ. Sci. 23: 266-274.
- [32] Clemens, S., 2006, Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plant, Biochimie 88: 1707-1719.
- [33] Vangnai, A., 2010, Bioremediation, 1st Ed., Chulalongkorn University Press, Bangkok, 351 p. (in Thai)
- [34] Cobbet, C. , 2002, Phytochelatins and metallothioneins: Role in heavy metal detoxification and homeostasis, J. Plant Biol. 53: 159-182. (in Thai)
- [35] Marchiol, L., Assolary, S., Sacco, P. and Zerbi, G., 2004, Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) growth on multicontaminated soil, Environ. Poll. 132: 21-27.