ว.วิทย. มข. 47(3) 498-507 (2562) KKU Sci. J. 47(3) 498-507 (2019)

การกำจัดตะกั่วที่สะสมในต้นข้าว

Bioaugmentation of Lead Accumulation in Rice

ธนิกา น้อยถนอม[1] จินตนาถ วงศ์ชวลิต[2] และธนวรรณ พาณิชพัฒน์[1*]

[1]หลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

[2]ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

[*]Corresponding Author, E-mail: faastwp@ku.ac.th

Received: 24 July 2018 | Revised: 30 January 2019 | Accepted: 10 August 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องการกำจัดตะกั่วที่สะสมในต้นข้าว โดยเปรียบเทียบการสะสมตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวที่เติมแบคทีเรียชนิดต่าง ๆ (TK1, TK3, RV2, RV4) จากผลการทดลอง พบว่า การเจริญเติบโตของข้าวที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนตะกั่ว โดยวัดความสูง น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05) ปริมาณความเข้มข้นตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของข้าว พบว่า ข้าวมีการสะสมตะกั่วในรากสูงที่สุด 57.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในชุดการทดลอง TK3 รองลงมาคือลำต้น 19.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในชุดการทดลอง TK3 และเมล็ด 0.55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในชุดการทดลอง RV2 ข้าวในงานวิจัยนี้ไม่เหมาะกับการนำมาใช้เป็นพืชบำบัด เนื่องจากข้าวมีค่า BCF และ TF มีค่าต่ำกว่า 1 โดย BCF เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของพืชในการดูดซับโลหะจากดิน ส่วน TF เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถของพืชในการลำเลียงโลหะจากรากสู่ลำต้น และ *Bacillus subtilis* strain EB31(TK1) เป็นแบคทีเรียที่แยกได้จากบริเวณรากของข้าว พบว่ามีศักยภาพสูงสุดในการบำบัดตะกั่ว และการทำ Bioaugmentation ของการทดลองนี้ จะใช้การเลือกเติมแบคทีเรียที่มีความสามารถช่วยลดการสะสมของตะกั่วในต้นข้าว

ABSTRACT

This research investigated bioaugmentation of lead accumulation in rice by comparing various treatments of bacteria (TK1, TK3, RV2, RV4) and evaluating lead accumulation in different parts of plant. The results showed that in term of growth performance (stem height, dry weight, fresh weight), there was no significant difference between rice plants grown in uncontaminated and lead contaminated soils (P>0.05). The highest lead accumulation was found in roots of TK3 (57.67 mg kg^{-1}), followed by shoot of TK3 (19.50 mg kg^{-1}), and grain of RV2 (0.55 mg kg^{-1}). The experimental rice in this study was not suitable for phytoremediation because the values of BCF and TF values were less than 1. BCF is capable to accumulate metals from soils, while TF indicated as the ability to translocate metals from the roots to the shoots and *Bacillus subtilis* strain EB31 from TK1, isolated from rhizosphere of rice, had the highest potential for lead bioremediation. Bioaugmentation of this research is used for reduction lead accumulation in rice by adding natural bacteria.

คำสำคัญ: การสะสม ข้าว ตะกั่ว แบคทีเรีย
Keywords: Accumulation, Rice, Lead, Bacteria

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมีเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นปัญหาในด้านทรัพยากรดิน ทรัพยากรน้ำ รวมถึงอากาศซึ่งล้วนแล้วมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในดินถือเป็นอีกหนึ่งปัญหาที่มีความรุนแรงมากขึ้น ทั่วโลกกำลังประสบปัญหาวิกฤตการณ์จากสภาวะมลพิษเหล่านี้ เนื่องจากการปนเปื้อน การสะสมสารเคมีและของเสียอันตรายที่เกิดจากการผลิต และการใช้สารเคมีในปริมาณมาก ทั้งในภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และการประกอบกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ได้แก่ การทำเหมืองแร่ เช่น ตะกั่วและดีบุก เป็นต้น (Yoon et al., 2006) โดยตะกั่วนั้นเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตแบตเตอรี่ และใช้ในการบัดกรีชิ้นส่วนโลหะชนิดต่าง ๆ แต่ตะกั่วมีโทษเช่นกัน หากทำให้เกิดการปนเปื้อนทั้งในแหล่งดิน น้ำ และอากาศ จะมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในบริเวณนั้น กล่าวคือ หากมีการบริโภคน้ำหรือพืชจากแหล่งที่มีการปนเปื้อนก็จะเป็นสาเหตุให้ตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย ส่งผลต่อระบบทางเดินอาหารมีอาการปวดท้องอย่างรุนแรง อาเจียน ถ่ายอุจจาระบ่อย ส่วนระบบประสาทตะกั่วจะทำลายหลอดเลือดฝอยในสมอง ทำให้เลือดไปเลี้ยงสมองไม่พอ อาการสมองที่เกิดขึ้น ได้แก่ ปวดศีรษะ อ่อนเพลีย ประสาทหลอน อาจเพ้อคลั่ง และหมดสติได้ (อลิสา, 2553) ในปัจจุบันประเทศไทยพบปริมาณของตะกั่วในสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และพบปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในหลายพื้นที่ โดยในปี พ.ศ. 2541 บริษัท ตะกั่วคอนเซนเตรทส์ (ประเทศไทย) จำกัด ดำเนินกิจการเหมืองแร่ตะกั่ว และมีการฝังกลบที่ไม่เป็นไปตามหลักวิชาการ ทำให้เกิดการปนเปื้อนในลำห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี และปนเปื้อนอยู่ในดินเป็นปริมาณมาก อีกทั้งยังพบว่าในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนตะกั่วได้มีการทำเกษตรกรรมโดยปลูกพืชเศรษฐกิจหลายประเภท เช่น ข้าว และข้าวโพด เป็นหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าว ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อสังคมไทย ชาวบ้านมีการเก็บไว้บริโภคในครัวเรือน จึงเป็นพืชที่มีความเสี่ยงว่าจะมีการปนเปื้อนของตะกั่ว เนื่องจากมีหลายงานวิจัยระบุว่าข้าวที่เจริญเติบโตอยู่ในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนตะกั่วจะสามารถดูดดึงตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินขึ้นมาสะสมยังส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวได้ นอกจากนี้จุลินทรีย์ในดินยังมีความสามารถในการปรับสภาพคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของดินให้เหมาะสมต่อการเพาะปลูก นอกจากจุลินทรีย์จะช่วยปรับคุณสมบัติกายภาพของดินแล้ว ยังสามารถทนอยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมของดินได้ เช่น สภาวะดินเค็ม สภาวะดินแห้งจัด หรือสภาวะดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยจุลินทรีย์เหล่านี้มีกลไกในการทนพิษ และกำจัดพิษของโลหะหนักต่าง ๆ ได้ (กานต์มณี, 2554) เช่น กลุ่ม *Pseudomonas* และกลุ่ม *Enterobacter* จากสาเหตุดังกล่าวข้างต้นนี้ จึงได้มีการเติมแบคทีเรียลงไปในดิน เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตของต้นข้าวที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนตะกั่ว และเปรียบเทียบการสะสมตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าว ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ต้นข้าวเพราะข้าวเป็นพืชที่ใช้บริโภคและใช้เลี้ยงสัตว์ของชาวคลิตี้ และแบคทีเรียที่คัดแยกมาได้ก็เป็นแบคทีเรียที่อาศัยอยู่บริเวณรอบรากต้นข้าว

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. การคัดเลือกและจัดจำแนกแบคทีเรียที่สามารถทนตะกั่ว

การคัดเลือกโดยคัดแยกจุลินทรีย์จากดินบริเวณรากอ่อนของข้าวที่ปลูกในบริเวณดินที่ปนเปื้อนตะกั่วที่หมู่บ้านคลิตี้ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี แบ่งเก็บเป็น 3 จุด ประกอบไปด้วย 1) จุดบริเวณกองตะกอนแร่ 2) บริเวณลำห้วย และ 3) บริเวณแปลงข้าว โดยทำการขุดดินบริเวณเพาะปลูกข้าวลึก 15 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างดินบริเวณรากฝอยของต้นข้าว โดยใช้กรรไกรที่ผ่านการฆ่าเชื้อตัดรากฝอยที่มีดินเกาะอยู่ จากนั้นใช้ปากคีบที่ผ่านการฆ่าเชื้อคีบเอารากดังกล่าวขึ้นมาใส่ลงในหลอดเก็บตัวอย่างที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ เก็บรักษาตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 0-4 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะนำมาทำการคัดแยกแบคทีเรียทนตะกั่ว ทำการเจือจางตัวอย่างดินและทำการแยกเชื้อบนอาหาร lead acetate agar ที่ความเข้มข้นของตะกั่ว 60 มิลลิกรัมต่อลิตร (pH 6.6) ทำการเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-5 วัน เพื่อคัดเลือกแบคทีเรียที่มีความสามารถในการทนพิษของตะกั่วที่ดีที่สุด เชื้อบริสุทธิ์ที่คัดแยกได้ถูกนำมาคัดเลือกโดยการนำมาเพาะเลี้ยงบนอาหาร lead acetate agar ที่ความเข้มข้นของตะกั่วตั้งแต่ 100-3,600 มิลลิกรัมต่อลิตร แบคทีเรียที่สามารถทนความเข้มข้นของตะกั่วสูงที่สุด จะถูกคัดเลือกและจัดจำแนก เพื่อนำไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป

การจัดจำแนกแบคทีเรียทนตะกั่ว โดยสกัดดีเอ็นเอ จากเซลล์จุลินทรีย์ที่คัดเลือกด้วยชุดสกัดดีเอ็นเอ Isoplant II kit (Wako Pure Chemical Industrial Ltd., Japan) เพิ่มปริมาณส่วน 16S rRNA ยีนของแบคทีเรียด้วยเทคนิคพีซีอาร์ โดยใช้ Tag polymerase (Toyobo, Tokyo, Japan) และนิวคลีโอไทด์ไพรเมอร์ คือ 27F และ 1525R ตรวจวิเคราะห์แถบดีเอ็นเอเป้าหมายขนาดประมาณ 1500 เบส ด้วยอิเล็คโตรโฟรีซีส หาลำดับนิวคลีโอไทด์ของ 16S rRNA ด้วย ABI PRISM 310 Genetic Analyzer แล้วนำผลที่ได้เทียบกับฐานข้อมูล เพื่อใช้เป็นแนวทางในการจัดจำแนกสายพันธุ์จุลินทรีย์ โดย NCBI BLAST

2. การเตรียมตัวอย่างดินและพืช

การทดลองนี้ทำภายในโรงเรือนของฝ่ายปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลองมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน โดยใช้เมล็ดพันธุ์ข้าวไร่หอม เก็บตัวอย่างดินปนเปื้อนตะกั่วและดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วจากสถาบันวิจัยและพัฒนากำแพงแสน โดยดินจะถูกนำมาคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกันและตากให้แห้งในโรงเรือนเป็นเวลา 2 สัปดาห์ จากนั้นนำตัวอย่างดินเข้าเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อโรค เพื่อให้อยู่ในสภาพปราศจากเชื้อ ซึ่งดินที่ปนเปื้อนตะกั่วจะใส่สารละลาย lead (II) acetate ($Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$) ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในดิน 1 ลิตร คลุกเคล้าให้ทั่ว ชั่งตัวอย่างดินใส่กระถาง กระถางละ 2 กิโลกรัม นำเมล็ดข้าวไร่หอมลงปลูก กระถางละ 3-5 เมล็ด หลังจากข้าวเจริญเป็นต้นกล้าและเจริญเติบโตมีความสูง 30-40 เซนติเมตร จึงถอนแยกให้เหลือกระถางละ 1 ต้นต่อกระถาง วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) มีจำนวน 5 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ รายละเอียดชุดการทดลองมีดังต่อไปนี้ ชุดการทดลองที่ 1 ปลูกข้าวไร่ในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว (control) ชุดการทดลองที่ 2 ปลูกข้าวไร่ในดินปนเปื้อนตะกั่วและใส่จุลินทรีย์ชนิดที่ 1 (TK1) ส่วนชุดการทดลองที่ 3 ปลูกข้าวไร่ในดินปนเปื้อนตะกั่วและใส่จุลินทรีย์ชนิดที่ 2 (TK3) ชุดการทดลองที่ 4 ปลูกข้าวไร่ในดินปนเปื้อนตะกั่วและใส่จุลินทรีย์ชนิดที่ 3 (RV2) และชุดการทดลองที่ 5 ปลูกข้าวไร่ในดินปนเปื้อนตะกั่วและใส่จุลินทรีย์ชนิดที่ 4 (RV4) โดยเก็บตัวอย่างดินทั้ง 2 ชนิด อย่างละ 1 กิโลกรัม มาวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน (Thomas, 1996) ค่าการนำไฟฟ้า (Richard, 1954) อินทรียวัตถุในดิน (Walkley and Black, 1947) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Chapman, 1965) และปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดิน

3. การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืช

การเจริญเติบโตของข้าว โดยการวัดความสูงของต้นข้าว คือ วัดจากข้อแรกของลำต้นข้าวจนถึงปลายใบยอด (ใบธง) ส่วนน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง เก็บตัวอย่างพืช โดยนำข้าวมาล้างทำความสะอาดดินที่ติดมาที่รากและต้น ด้วยน้ำประปา แล้วทำการแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ราก ส่วนเหนือดิน และส่วนเมล็ด ทำการชั่งน้ำหนักสด บันทึกข้อมูล จากนั้นนำตัวอย่างพืชใส่ถุงกระดาษและนำไปอบในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากอบแห้งแล้ว นำมาชั่งน้ำหนักแห้งอีกครั้ง (Panich-pat and Srinives, 2009)

4. การวิเคราะห์การสะสมตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของพืช

บดตัวอย่างพืชที่ผ่านการอบแห้งจนละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร ชั่งตัวอย่างพืช 0.2 กรัม ใส่หลอดทดลองขนาด 75 มิลลิลิตร เติมกรดผสม conc. HNO_3 และ conc. $HClO_4$ อัตราส่วน 5:1 จำนวน 12 มิลลิลิตร นำไปใส่ hot-block digestion ย่อยสารละลายตัวอย่างจนได้สารละลายใส ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนปริมาตรเท่ากับ 50 มิลลิลิตร กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman no. 42 นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วด้วยเครื่อง Flame Atomic Absorption Spectrophotometry (FAAS) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AA-6200

5. ประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของตะกั่วสู่พืช

5.1 Bioconcentration factor (BCF) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของพืชในการดูดซับตะกั่วจากดินที่ปนเปื้อน โดยนำค่าความเข้มข้นของตะกั่วในข้าวทั้งหมด ต่ออัตราส่วนปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดิน ดังสมการต่อไปนี้ (Yoon et al., 2006)

$$BCF = \frac{Pb\ Plant\ (mg/kg)}{Pb\ Soil\ (mg/kg)}$$

5.2 Translocation factor (TF) เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถของพืชในการลำเลียงตะกั่วจากรากสู่ลำต้นและใบ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากปริมาณตะกั่วในข้าวของส่วนเหนือดิน ต่ออัตราส่วนปริมาณตะกั่วในราก ดังสมการต่อไปนี้ (Yoon et al., 2006)

$$TF = \frac{Pb\ Plant\ in\ shoot\ (mg/kg)}{Pb\ Soil\ in\ root\ (mg/kg)}$$

ค่า BCF และ TF สามารถนำมาประเมินเพื่อเลือกใช้พืชในการบำบัดพื้นที่ที่ปนเปื้อนโลหะได้ โดยพืชที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับจะต้องมีค่า BCF และ TF มากกว่า 1 ซึ่งเหมาะสมเป็นพืชบำบัดในพื้นที่ที่ปนเปื้อนตะกั่ว ถ้าค่า BCF และ TF น้อยกว่า 1 แสดงว่าพืชมีความสามารถในการดูดซับน้อย จึงไม่เหมาะต่อการเป็นพืชบำบัด

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของดินก่อนและหลังทดลอง

รายการวิเคราะห์	ค่าที่วิเคราะห์ได้			
	ดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว		ดินปนเปื้อนตะกั่ว	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
pH	6.69	6.62	7.26	6.92
EC (dS m^{-1})	7.20	6.35	3.95	6.58
Organic matter (%)	4.30	5.24	5.64	8.32
CEC (cmol kg^{-1})	7.75	8.21	13.96	17.49
Total Pb (mg kg^{-1})	5.48	2.39	500.00	233.67
Available soil Pb (mg kg^{-1})	0.93	1.22	11.75	20.10

6. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ผลการทดลองที่ได้แต่ละชุดการทดลองนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS 15.0 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($P \leq 0.05$) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของชุดการทดลองด้วยวิธี Analysis of variance (ANOVA)

ผลการวิจัย

1. แบคทีเรียที่ใช้ในการทดลอง

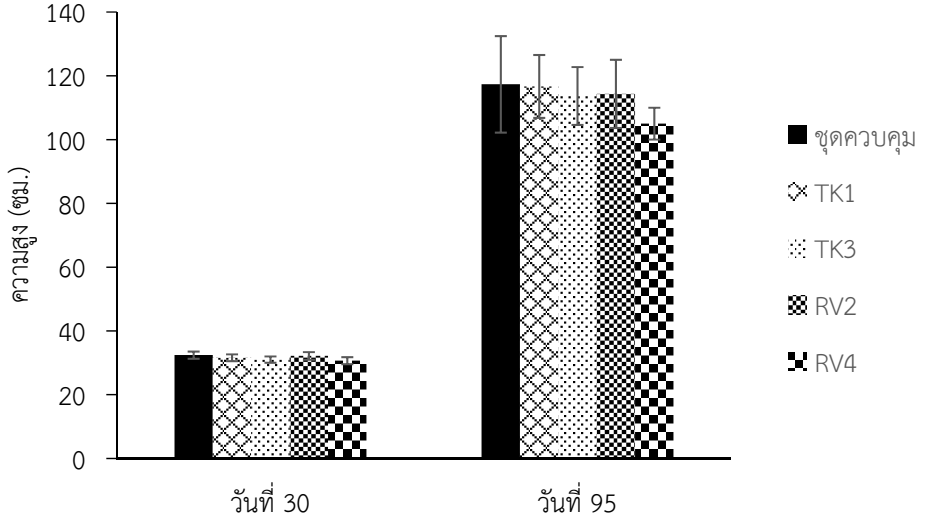
การคัดเลือกแบคทีเรียที่สามารถทนความเข้มข้นตะกั่วได้ดีที่สุด พบว่ามีทั้งหมด 4 ไอโซเลต คือ *Bacillus subtilis* strain EB31. TK1, *Enterobacter* sp. TK3, *Pseudomonas chlororaphis* subsp. RV2, และ *Microvirgula* sp. RV4 (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ค่าความเหมือนของแบคทีเรียที่จำแนกได้แต่ละไอโซเลตกับแบคทีเรียในฐานข้อมูล NCBI โดยใช้โปรแกรม BLAST เปรียบเทียบลำดับเบส

Code number	GenBank acc.no	Best match with	Identity %
TK1	KC197815.1	*Bacillus subtilis* strain EB31	98%
TK3	KF582906.1	*Enterobacter* sp.	97%
RV2	AB680101.1	*Pseudomonas chlororaphis* subsp.	97%
RV4	KR029290.1	*Microvirgula* sp.	98%

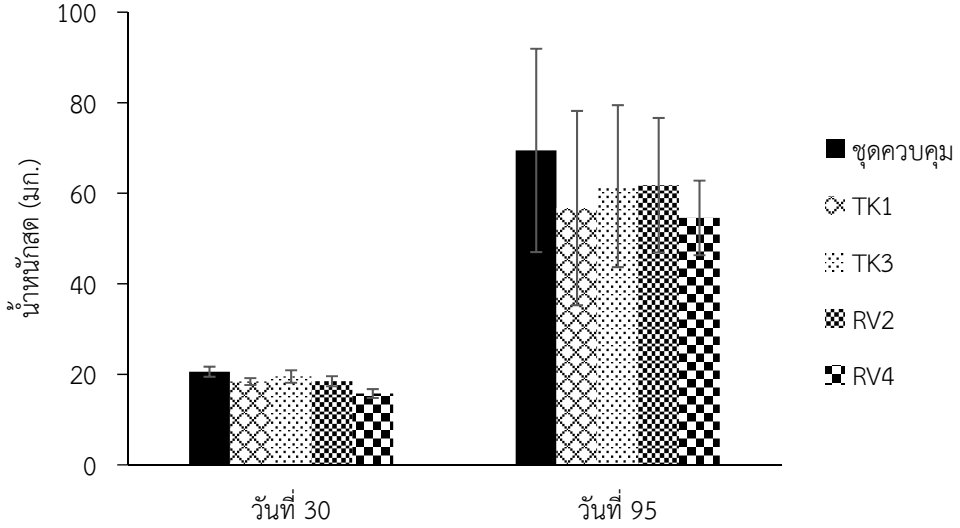
2. การเจริญเติบโตของข้าว

จากการศึกษาการเจริญเติบโตของข้าว โดยพิจารณาจากความสูง น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง พบว่า ความสูงของข้าวที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนมีความสูงสุดเฉลี่ย 117.33 ±15.14 เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว พบว่า ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) (รูปที่ 1) ชุดการทดลองที่ 2 (TK 1) ชุดการทดลองที่ 3 (TK 3) ชุดการทดลองที่ 4 (RV 2) และชุดการทดลองที่ 5 (RV4) มีความสูงเฉลี่ย 116.67±9.87 เซนติเมตร 113.67±9.07 เซนติเมตร 114.33±10.69 เซนติเมตร และ 105±5.00 เซนติเมตร ตามลำดับ

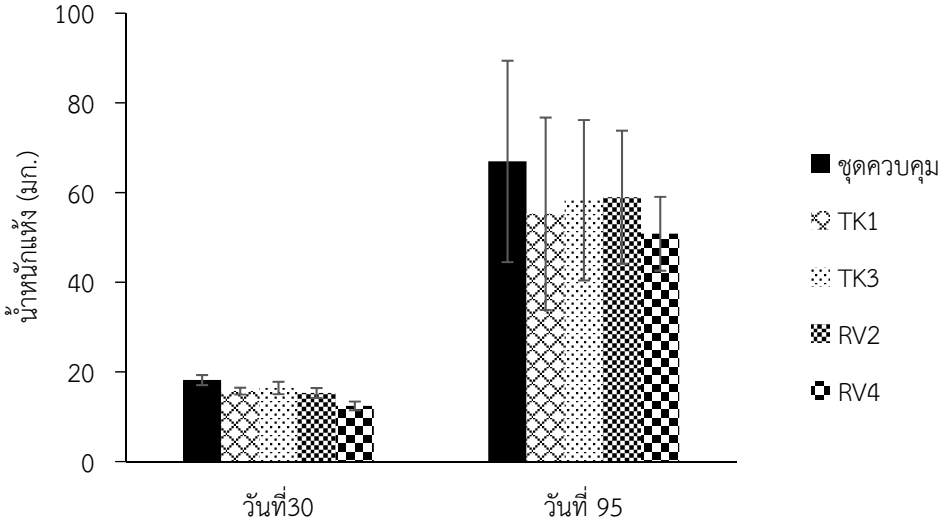


รูปที่ 1 ความสูงของข้าวที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนตะกั่วตั้งแต่ระยะกล้า (30 วัน) จนถึงเก็บเกี่ยว (95 วัน)

น้ำหนักสดของข้าวที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดสูงสุด เท่ากับ 69.46±22.46 กรัม เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว พบว่า ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05) (รูปที่ 2) ชุดการทดลองที่ 2 (TK1) ชุดการทดลองที่ 3 (TK 3) ชุดการทดลองที่ 4 (RV 2) และชุดการทดลองที่ 5 (RV4) มีน้ำหนักสดเฉลี่ย 56.72±21.46 กรัม 61.57±17.89 กรัม 61.77±14.86 กรัม และ 54.55±8.24 กรัม ตามลำดับ น้ำหนักแห้งของข้าวที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งสูงสุดเท่ากับ 66.93±22.46 กรัม เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว พบว่า ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05) (รูปที่ 3) ชุดการทดลองที่ 2 (TK1) ชุดการทดลองที่ 3 (TK 3) ชุดการทดลองที่ 4 (RV 2) และชุดการทดลองที่ 5 (RV4) มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 55.26±21.46 กรัม 58.27±17.89 กรัม 58.94±8.24 กรัม และ 50.80±8.24 กรัม ตามลำดับ



รูปที่ 2 น้ำหนักสดของข้าวที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนตะกั่วตั้งแต่ระยะกล้า (30 วัน) จนถึงเก็บเกี่ยว (95 วัน)



รูปที่ 3 น้ำหนักแห้งของข้าวที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนตะกั่วตั้งแต่ระยะกล้า (30 วัน) จนถึงเก็บเกี่ยว (95 วัน)

จากผลการศึกษาพบแบคทีเรีย 2 กลุ่ม ได้แก่ แบคทีเรียแกรมบวก คือ *Bacillus subtilis* strain EB31. TK1 และแบคทีเรียแกรมลบ คือ *Enterobacter* sp. TK3, *Pseudomonas chlororaphis* subsp. RV2 และ *Micro-virgula* sp. RV4 ทำการทดสอบผลของเชื้อจุลินทรีย์ในระดับกระถาง โดยพิจารณาจากความสูง น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในข้าว พบว่าข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* strain EB31. TK1 ข้าวมีความสูงที่สุด ส่วนข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Microvirgula* sp. RV4 มีความสูงเฉลี่ยต่ำสุด น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว จากชุดการทดลองพบว่าข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Pseudomonas chlororaphis* subsp. RV2 มีการสะสมน้ำหนักสดมากที่สุด ส่วนข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Microvirgula* sp. RV4 มีการสะสมน้ำหนักสดน้อยสุด ด้านน้ำหนักแห้งของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว พบว่าข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Pseudomonas chlororaphis* subsp. RV2 มีการสะสมน้ำหนักแห้งมากที่สุด ส่วนข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Microvirgula* sp. RV4 มีการสะสมน้ำหนักแห้งน้อยที่สุด เช่นเดียวกัน

3. ความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของข้าว

ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของข้าว พบว่า ความเข้มข้นของตะกั่วในรากมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) โดยข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Enterobacter* sp. TK3 มีความเข้มข้นตะกั่วในรากสูงสุดเท่ากับ 57.67±1.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* strain EB31. TK1 มีความเข้มข้นของตะกั่วในรากต่ำสุดเท่ากับ 42.82±16.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ด้านความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนลำต้นนั้น พบว่า ความเข้มข้นของตะกั่วในลำต้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) โดยข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Enterobacter* sp. TK3 มีความเข้มข้นตะกั่วในลำต้นสูงสุดเท่ากับ 19.50±0.59 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Microvirgula* sp. RV4 มีความเข้มข้นตะกั่วในลำต้นต่ำสุดเท่ากับ 16.12±0.66 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และความเข้มข้นตะกั่วในเมล็ดข้าว พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) โดยข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Pseudomonas chlororaphis* subsp. RV2 มีความเข้มข้นตะกั่วในเมล็ดสูงสุดเท่ากับ 0.55±0.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Microvirgula* sp. RV4 ความเข้มข้นตะกั่วในเมล็ดต่ำสุดเท่ากับ 0.26±0.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เป็นเวลา 95 วัน

ชุดการทดลอง	ความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของพืช (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง)		
	ราก	ลำต้น	เมล็ด
Bacillus subtilis strain EB31 (TK1)	42.82±16.94[b]	17.03±0.47	0.47±0.11[a]
Enterobacter sp. (TK3)	57.67±1.60[a]	19.50±0.59	0.52±0.18[a]
Pseudomonas chlororaphis subsp. (RV2)	51.69±1.12[a]	17.01±1.81	0.55±0.14[a]
Microvirgula sp. (RV4)	50.48±1.41[a]	16.12±0.66	0.26±0.05[b]
ANOVA (F-test)	*	ns	*

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) เปรียบเทียบโดยวิธี Analysis of variance (ANOVA) ในคอลัมน์ (a มากกว่า b), ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05) โดยเปรียบเทียบวิธี Analysis of variance (ANOVA)

4. ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายตะกั่วสู่พืช

Bioconcentration factor (BCF) เป็นค่าแสดงถึงประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากดินเข้ามาสะสมในพืช พิจารณาจากค่า BCF จากผลการทดลอง พบว่า ข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีค่า BCF ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05) โดยค่าความเข้มข้นทางชีวภาพสูงสุดพบในข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Enterobacter* sp. TK3 เท่ากับ 0.15±0.01 ส่วนค่าความเข้มข้นทางชีวภาพต่ำสุดพบในข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* strain EB31. TK1 เท่ากับ 0.10±0.03 และการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากสู่ส่วนเหนือดินของพืช Translocation factor (TF) จากการทดลอง พบว่า ค่า TF ของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนมีความแตกต่างกันทางสถิติ (P≤0.05) โดยค่าเฉลี่ยปัจจัยการเคลื่อนย้ายสูงสุดพบในข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* strain EB31. TK1 เท่ากับ 0.70±0.50 ส่วนปัจจัยการเคลื่อนย้ายต่ำสุดพบในข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Microvirgula* sp. RV4 เท่ากับ 0.33±0.01 แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่า Bioconcentration factor และ Translocation factor ของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว

ชุดการทดลอง	Bioconcentration factor	Translocation factor
Bacillus subtilis strain EB31. (TK1)	0.10±0.03	0.70±0.50[a]
Enterobacter sp. (TK3)	0.15±0.01	0.54±0.34[a]
Pseudomonas chlororaphis subsp. (RV2)	0.14±0.01	0.34±0.04[b]
Microvirgula sp. (RV4)	0.13±0.01	0.33±0.01[b]
ANOVA (F-test)	ns	*

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) เปรียบเทียบโดยวิธี Analysis of variance (ANOVA) ในคอลัมน์ (a มากกว่า b), ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05) โดยเปรียบเทียบวิธี Analysis of variance (ANOVA)

วิจารณ์ผลการวิจัย

การเจริญเติบโตของข้าวที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนตะกั่วนั้นเมื่อพิจารณาจากความสูง น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง พบว่าทั้งข้าวที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและดินปนเปื้อนตะกั่วมีความสูงที่ไม่แตกต่างกันมากนัก จะพบว่าในวันที่ 95 มีค่า error bar ที่สูงมาก เป็นเพราะข้อมูลความสูง น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของวันที่ 95 นั้น ข้อมูลแต่ละตัวมีการกระจายตัวออกไปมาก ทำให้มีค่าความแปรปรวนมากกว่าวันที่ 30 จากการทดลองพบว่า ค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตของรากและลำต้นของข้าวที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว มีค่ามากกว่าข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว อาจกล่าวได้ว่า ตะกั่วมีความเป็นพิษหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของข้าว ทำให้ค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตของรากและลำต้นลดลง พบว่า Bazzaz et al. (1974) พบว่า ตะกั่วมีผลทำให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง และการหายใจของพืชทั้งสองลดลง รากไม่มีการเจริญเติบโต และมีลักษณะกุดสั้น แสดงถึงความเป็นพิษของตะกั่วที่มีผลต่อการงอก ส่วนข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนแต่ละชุดการทดลอง มีความสูงไม่แตกต่างกันมากนัก พบว่า ข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* strain EB31. TK1 มีความสูงที่สุด ซึ่ง *Bacillus subtilis* สร้าง bio-

polymer ได้ อีกทั้ง biopolymer มีหมู่อะมิโน จึงมีคุณสมบัติในการจับกับอิออนของโลหะได้ดี โดย biopolymer ที่สร้างออกมาสามารถปรับโครงสร้างดิน ทำให้ดินบริเวณนั้นมีความอุดมสมบูรณ์ และอุ้มน้ำมากขึ้น (ภาวดี, 2544) จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้พืชมีการเจริญเติบโต ส่วนข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Microvirgula* sp. RV4 มีความสูงน้อยสุด เนื่องจากสามารถผลิตกรดฟอร์มิก (formic) จึงช่วยให้ดินเป็นกรดมากขึ้น ส่งผลให้โลหะหนักสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น (Subhash, 2016) ตะกั่วสะสมในพืชสูงขึ้น ความเป็นพิษอาจทำให้การเจริญเติบโตช้าลงหรือทำให้พืชตายได้

น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของข้าวที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนตะกั่วมีการสะสมน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งใกล้เคียงกัน เป็นเพราะในดินที่ปนเปื้อนตะกั่วมีปริมาณอินทรียวัตถุ และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงกว่าดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่ว เนื่องจากตะกั่วมีโอกาสในการสร้างพันธะกับอินทรียวัตถุในดิน ทำให้ตะกั่วถูกตรึงเอาไว้ ส่งผลให้พืชที่เจริญเติบโตในดินเหล่านี้สามารถดูดดึงตะกั่วเข้ามาสะสมในส่วนต่าง ๆ ได้ลดลง ความเป็นพิษของตะกั่วที่มีต่อพืชจึงลดลง พืชที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่วจึงมีการเจริญเติบโตที่ไม่ต่างกัน (Greger, 1999) ส่วนน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อน พบว่าข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Pseudomonas chlororaphis* subsp. RV2 มีการสะสมน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งสูงสุด และข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Microvirgula* sp. RV4 มีการสะสมน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งน้อยที่สุด เนื่องจาก *Pseudomonas* sp. RV2 มีกลไกการลดตะกั่วในแหล่งปนเปื้อน โดยดูดซับตะกั่วด้วยหมู่ functional groups บนพื้นผิวเซลล์ ส่งผลให้มีการสะสมตะกั่วในพืชน้อย พืชจึงมีการเจริญเติบโตได้มากกว่า *Microvirgula* sp. RV4 ที่สามารถทำให้ดินเป็นกรด โลหะละลายในน้ำได้มากขึ้น พืชมีการสะสมตะกั่วสูงขึ้น ส่งผลความเป็นพิษ ทำให้การเจริญเติบโตช้าลง (Subhash, 2016) จากการศึกษาการสะสมปริมาณตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของข้าวในดินปนเปื้อนแต่ละชุดการทดลอง พบว่าในแต่ละชุดการทดลองมีปริมาณตะกั่วสะสมในข้าวใกล้เคียงกัน ชุดข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* strain EB31. TK1 มีปริมาณการสะสมตะกั่วเฉลี่ยน้อยกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ อีกทั้งต้นข้าวของชุดการทดลองนี้มีความสูงที่สุด (Lagauskas, 2005) *Bacillus* sp. มีการสร้างสาร polysaccharide ที่มี functional groups เป็นประจุลบ (OH^-) จับกับตะกั่ว (Pb^{2+}) ที่เป็นประจุบวก โดยตรึงโลหะไว้ภายนอกเซลล์ อีกทั้งยังสร้าง biopolymer โดย biopolymer ที่สร้างออกมาสามารถปรับโครงสร้างดิน ทำให้ดินบริเวณนั้นมีความอุดมสมบูรณ์ และอุ้มน้ำมากขึ้น (ภาวดี, 2544) จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้พืชมีการเจริญเติบโต ส่วนเชื้อ *Pseudomonas chlororaphis* subsp. RV2 มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้พอ ๆ กับเชื้อ *Bacillus* sp. แต่ *Pseudomonas* sp. ไม่มีการสร้างสปอร์ จึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ *Bacillus* sp. มีการบำบัดดินที่ปนเปื้อนได้ดีกว่าเนื่องจากสปอร์ของแบคทีเรียจะเกิดขึ้นเมื่อสภาวะแวดล้อมไม่เหมาะสม เช่น ขาดสารอาหาร หรือมีสารพิษ (Lagauskas, 2005) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen et al. (2011) ได้ศึกษาการบำบัดดินปนเปื้อนตะกั่วด้วยแบคทีเรียที่ทนตะกั่ว โดยทำการศึกษาในกระถางทดลองด้วยแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ*Bacillus pumilus* และ *Pseudomonas aeruginosa* จากดินปนเปื้อนตะกั่วในเขตเหมืองแร่ เมือง Heilongjian ประเทศจีน และนำไปศึกษาการบำบัดตะกั่วในกระถางทดลองที่มีระดับตะกั่วที่แตกต่างกัน คือ 0, 200, 400, 600, 800 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ดินบริเวณรากพืชมีความเข้มข้นตะกั่วลดลง และหลังจาก 48 วันของการเพาะปลูกความเข้มข้นตะกั่วที่ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบ *Bacillus pumilus* มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีกว่า *Pseudomonas aeruginosa* ส่วนข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Microvirgula* sp. RV4 และ *Enterobacter* sp. TK3 มีประสิทธิภาพในการบำบัดตะกั่วต่ำกว่าข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Bacillus* sp. และ *Pseudomonas chlororaphis* subsp. เนื่องจาก *Enterobacter* sp เป็นเชื้อที่ไม่สร้างสปอร์ สามารถย่อยพวก lactose ให้เกิดกรดและแก๊สได้ ส่วน *Microvirgula* sp สามารถทำปฏิกิริยากับกรดฟอร์มิกได้ Gadd (2009) รายงานว่า กรดออกซาลิก กรดซิตริก และกรดฟอร์มิก สามารถเปลี่ยนโลหะหนักให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซึมผ่านรากได้ ซึ่งจะช่วยให้ดินมีความเป็นกรดมากขึ้นส่งผลให้โลหะหนักสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้พืชสามารถดูดซึมโลหะหนักได้ดียิ่งขึ้นด้วย จึงทำให้ข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Microvirgula* sp. RV4 และ *Enterobacter* sp. TK3 มีการสะสมโลหะหนักในพืชสูง

การเคลื่อนย้ายจากดินเข้าสู่พืช (Bioconcentration factor, BCF) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีความสำคัญในการศึกษาการ

สะสมและการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก (Yoon et al., 2006) โดยชนิดพืชที่ควรนำมาพิจารณาเพื่อใช้ในการบำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโลหะควรมีค่า BCF มากกว่า 1 จากการทดลอง พบว่าค่าความเข้มข้นทางชีวภาพสูงสุดพบในข้าวที่ปลูกในดินที่เติมแบคทีเรีย *Enterobacter* sp. TK3 อาจเพราะ *Enterobacter* sp. เป็นเชื้อที่สามารถย่อยพวก lactose ให้เกิดกรดและแก๊ส ส่งผลให้โลหะหนักละลายน้ำได้มากขึ้น ซึ่งช่วยให้พืชสามารถดูดซึมโลหะหนักได้ดียิ่งขึ้นด้วย จึงทำให้พืชมีการสะสมโลหะหนักสูง แต่พืชกลุ่มนี้มีค่าการเคลื่อนย้ายตะกั่วเข้ามาสะสมในตัวพืชต่ำกว่า 1 จึงไม่เหมาะสมในการบำบัดในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนตะกั่วในความเข้มข้นสูงได้ ปัจจัยการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากสู่ส่วนเหนือดินของพืช (Translocation factor, TF) หากค่าปัจจัยการเคลื่อนย้ายมากกว่า 1 แสดงให้เห็นว่า โลหะหนักมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายจากรากสู่ส่วนเหนือดิน โดยจากการทดลองพบว่า ค่าเฉลี่ยปัจจัยการเคลื่อนย้ายในการทดลองมีค่าน้อย กว่า 1 อาจเพราะ แบคทีเรียรอบรากพืชมีบทบาทที่สำคัญในการเคลื่อนที่ และการตรึงโลหะหนักไว้ อีกทั้งยังมีอิทธิพลต่อการดูดดึงตะกั่วในพืชด้วย นอกจากนี้ตะกั่ว (Pb^{2+}) ยังมีขนาดประจุมาก แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ ดังนั้นโลหะที่มีประจุบวกมากจะมีแนวโน้มที่ถูกดูดซับไว้ที่ดินสูงมาก สุภาพร (2545) รายงานว่า ส่วนใหญ่แล้วตะกั่วจะสะสมในรากและมีปริมาณน้อยมากที่เคลื่อนที่ไปสะสมในส่วนเหนือดิน สอดคล้องกับสรัตนา (2548) ศึกษาการสะสมและการกระจายของโลหะในข้าวสาลีที่ได้รับน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนัง พบว่า ในข้าวสาลีมีค่า BCF น้อยกว่า 1 อาจกล่าวได้ว่าข้าวสาลีไม่เหมาะสมในการบำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการกำจัดตะกั่วที่สะสมในต้นข้าว พบการคัดแยกแบคทีเรียบริเวณรอบรากข้าวที่ทนต่อความเข้มข้นตะกั่วได้แบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียแกรมบวก ได้แก่ *Bacillus subtilis* strain EB31. (TK1) และแบคทีเรียแกรมลบ ได้แก่ *Enterobacter* sp. (TK3), *Pseudomonas chlororaphis* subsp. (RV2) และ *Microvirgula* sp. (RV4) ซึ่ง *Bacillus subtilis* strain EB31. (TK1) มีศักยภาพในการบำบัดดินปนเปื้อนตะกั่วสูงสุด การเจริญเติบโตของข้าวที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนตะกั่วนั้นมีการเจริญเติบโตใกล้เคียงกัน ความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของข้าว ทั้งในดินไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนตะกั่ว พบว่า ตะกั่วมีการสะสมในรากสูงที่สุด รองลงมา คือ ลำต้น และเมล็ด ตามลำดับ ค่า BCF และ TF ที่ใช้ประเมินเพื่อเลือกพืชใช้ในการบำบัดพื้นที่ที่ปนเปื้อนโลหะ พบว่าข้าวมีค่า BCF และ TF น้อยกว่า 1 ดังนั้นข้าวในการทดลองนี้ไม่มีประสิทธิภาพในการใช้เป็นเครื่องมือบำบัดตะกั่วในดินปนเปื้อน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561 และทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจากหลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

กานต์มณี จันทร์ขาว. (2554). โครงสร้างประชากรของเชื้อราและแบคทีเรียบริเวณรากหญ้าแฝกลุ่มและหญ้าแฝกดอนที่ปลูกในดินเค็มและดินเปรี้ยวจัด.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภาวดี เมธะดานนท์. (2544). ความรู้เกี่ยวกับไคติน – ไคโตซาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติ

สรัตนา เสนาะ. (2548). การดึงดูดธาตุโลหะของหญ้าแฝก ทานตะวัน และข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสี แคดเมียม ตะกั่ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุภาพร พงค์ธรพฤกษ์. (2545). การสะสมตะกั่วและแคดเมียมในพืชผัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

อลิสา วังใน. (2553). การบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Bazzaz, F. A., Rolfe, G.L. and Windle, P. (1974). Differing sensitivity of corn and soybean photosynthesis and transpiration to lead contamination. J. Environ. Qual. 3: 156-158.

Chapman, H.D. (1965). Cation Exchange Capacity. Methods of Soil Analysis, part 2, Ed., Black, C.A. Madison, WI: American Society of Agronomy. 891-901.

Chen, B., Liu, J.N., Wang, Z., Dong, L., Fan, J.H. and Qu, J.J. (2011). Remediation of Pb-resistant bacteria to Pb polluted soil. J Environ Protect. 2: 130–141.

Gadd, G.M. (1990). Heavy metal accumulation by bacteria and other microorganisms. Experientia. 46(8): 834-840.

Greger, M. (1999). Metal availability and bioconcentration in plant. *In* M.N.V. Prasad and J. Hagemeyer, eds., Heavy Metal Stress in Plant. Berlin: Spinger-Varlag. 1-28.

Lugauskas, A., Levinskaite, L., Peeiulyte, D., Repeekiene, J., Motuzas, A., Vaisvalavieius, R. and Prosyeevas, I. (2005). Effect of copper, zinc and lead acetates on microorganisms in soil. Ekologija. 1: 61–69.

Panich-pat, T. and Srinives, P. (2009). Partitioning of lead accumulation in rice plants. Thai J. Agric. Sci. 42(1): 35-40.

Richards, L. A. (1954). Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils. U.S. Salinity Laboratory. U.S. Dept. Agr. Hbk.

Subhash, Y., Min, J.P. and Sang, S.L. (2016). *Microvirgula curvata* sp. nov., isolated from hydrocarbon-contaminated soil, and emended description of the genus *Microvirgula.* J Syst Evol Microbiol. 66: 5309-5313.

Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity, In D.L. Sparks et al., eds., Method of Soil Analysis Part 3 Chemical Method. Soil Sci. Am. J. 475-490.

Walkley, A. and Black, I.A. (1947). Chromic acid titration method for determination of soil organic matter. Soil Sci Amer Proc. 63: 257.

Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q. and Ma, L.Q. (2006). Accumulation of Pb, Cu and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. Sci Total Environ. 368: 456-464.

❑❑❑❑❑