



โครงการ การศึกษาการสะสมของสารตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าว
**PARTITIONING OF LEAD ACCUMULATION
IN RICE PLANT**

โดยนางสาวธนวรรณ พาณิชพัฒน์

30 เมษายน พ.ศ. 2551

สัญญาเลขที่ **MRG4880179**

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาการสะสมของสารตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าว
**PARTITIONING OF LEAD ACCUMULATION
IN RICE PLANT**

คณะผู้วิจัย สังกัด

นางสาวธนวรรณ พาณิชพัฒน์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ. นครปฐม

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัยสกอ. และสกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

โครงการ การศึกษาการสะสมของสารตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าว (Partitioning of lead accumulation in rice plant)

บทคัดย่อ

จากการศึกษาการสะสมของสารตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าว ได้แก่ ราก ลำต้นและใบ และเมล็ดข้าว ใช้เวลาศึกษาทั้งสิ้น 2 ปี โดยใช้เมล็ดข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่ปลูกกันมากในอำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม การทดลองแบบ preliminary test เมื่อข้าวแตกกอจึงเติมสารละลายตะกั่วอะซิเตทที่ความเข้มข้น 0, 2,500, 5,000, 7,500 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่ความเข้มข้น 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นค่าที่ข้าวสามารถสะสมตะกั่วได้มากที่สุด ในเมล็ด จึงนำค่าดังกล่าวมาทำการทดลองแบบ batch study โดยแบ่งความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเป็น 2 ค่า ที่ความเข้มข้น 1,500 และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นเติมลงในดินที่ข้าวระยะแตกกอ พบว่า ตะกั่วจะสะสมได้มากที่สุดที่ความเข้มข้นของตะกั่วสูงสุดในราก (400.48 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ลำต้นและใบ (127.68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ในเมล็ดส่วนของรำ (5.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) แกลบ (0.19 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ส่วนข้าวขาวจะไม่พบการสะสมของตะกั่ว เมื่อนำเมล็ดข้าวจาก batch study มาปลูกโดยไม่เติมสารละลายตะกั่วลงในดิน เป็นการทดลองแบบ pot study พบว่า มีการถ่ายทอดการสะสมของตะกั่วจาก batch study ไปสู่ pot study ในส่วนของราก ลำต้นและใบ และรำ แต่ไม่พบการสะสมของตะกั่วในแกลบเฉพาะ pot study ส่วนข้าวขาวจะไม่พบการสะสมของตะกั่วในทั้ง batch และ pot study นำรำข้าวที่มีการสะสมของตะกั่วสูงที่สุดจาก batch study มาตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องผ่าน พบว่า ตะกั่วจะสะสมมากที่ แวกิวโอล เอนโดพลาสมิก เรติคิวลัม และ ไซโตพลาสซึม จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของตะกั่วในข้าวขาวไม่เกินมาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อนใช้กำหนดให้มีตะกั่ว 1 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ดังนั้น การบริโภคข้าวขาวจะไม่เกิดการเป็นพิษจากสารตะกั่ว อย่างไรก็ตามควรระมัดระวังในการนำฟางปนเปื้อนได้ไม่เกินข้าวที่มีการปนเปื้อนของสารตะกั่วไปใช้เลี้ยงสัตว์ เพราะตะกั่วสามารถสะสมในต้นข้าวได้มากในส่วนของราก ลำต้นและใบ เมื่อพิจารณาศักยภาพของข้าวในการใช้บำบัดตะกั่วในดิน พบว่า ต้นข้าวสามารถดูดซับตะกั่วในดินได้น้อย ไม่เหมาะสมที่จะเลือกใช้เป็นพืชบำบัดสารตะกั่วในดิน

Abstract

A greenhouse study was conducted to examine the lead accumulation in various rice plant parts such as root, stem and leaf and grain for two consecutive years. Rice cv. 'Prathum Thani 1' used in this study because it has been widely grown in Kamphang Saen district, Nakhon Pathom province. Lead subacetate was supplied as a solution in distilled water at the concentration of 0, 2,500, 5,000, 7,500 and 10,000 mg of Pb L⁻¹ until the rice plant reached tillering stage. The result from the preliminary test indicated that the concentration at 2,500 mg Pb L⁻¹ allowed highest lead accumulation and this chosen as the reference concentration for the batch study. The batch study comprised two concentrations of 1,500 and 3,000 mg Pb L⁻¹, and applied once in the soil at tillering stage. The result of the batch study revealed that lead accumulation was the highest in root (400.48 mg kg⁻¹), stem and leaf (127.68 mg kg⁻¹), bran (5.3 mg kg⁻¹) and husk (0.19 mg kg⁻¹), respectively. White rice has no detectable lead accumulation. The grains from the batch study were sown in the soil without lead solution in a pot study. The result showed that lead translocation from the batch study to the pot study was noticeable root, stem and leaf, and bran, but not in husk for pot study. White rice had not found in both the batch and pot studies. The bran with highest lead accumulation from the batch study was checked on the transmission electron microscope which revealed lead accumulation in vacuole, endoplasmic reticulum and cytoplasm. From this study, the concentration of lead in rice grain did not exceed the food hygiene concentration limit (1.0 mg of Pb kg⁻¹ DW per 1.0 kg food weight). Thus, it is unlikely that lead can be accumulated to the toxic level in rice grain. However, the result from pot study showed that the concentrations of lead accumulated in stem and leaves (2.95 mg kg⁻¹) as well as root (23.85 mg kg⁻¹) was rather high for using as animal feed. Although rice plants can accumulate some amount of lead, it is not suitable for use in cleaning up lead in soil.

Key words: lead accumulation, *Oryza sativa*, rice, grain

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

โครงการการศึกษาการสะสมของสารตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าว ต้องการศึกษาถึงการสะสมของสารตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าว โดยเฉพาะการสะสมในเมล็ด ที่อาจเป็นปัญหาแก่ผู้บริโภค เพราะตะกั่วมีความเป็นพิษสูงโดยมีผลกระทบต่อระบบต่าง ๆ ในร่างกายมนุษย์ การสะสมของตะกั่วในเมล็ดข้าวยังคงเป็นปริศนาว่าสามารถถูกถ่ายทอดจากรุ่นหนึ่งไปสู่อีกรุ่นหนึ่งได้หรือไม่ หรือถ่ายทอดได้เป็นปริมาณเท่าใด และตะกั่วสามารถสะสมอยู่ในส่วนใดของเมล็ดข้าวได้บ้าง การทดลองนี้ปลูกข้าวทั้งสิ้น 3 รุ่น ใช้เวลาอย่างน้อยรุ่นละ 3 เดือน ซึ่งประสบปัญหาอุปสรรคหลายประการ เช่น แมลงศัตรูข้าว โรคข้าว หนูกัดกินรวงข้าว ปัญหาเรื่องแสง สถานที่ทำการทดลอง และฤดูกาล ทำให้ต้องมีการปรับปรุง เปลี่ยนแปลง และแก้ปัญหามากมายหน้าของการทดลองอยู่ตลอดเวลาจนประสบความสำเร็จเป็นที่น่าพอใจ โดยงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. preliminary test เป็นการหาค่าความเข้มข้นเบื้องต้นของสารตะกั่วที่จะเลือกใช้ในการทดลองนี้ ซึ่งพบว่า ค่าความเข้มข้นของสารตะกั่ว 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการสะสมของตะกั่วในเมล็ดได้สูงที่สุด
2. batch study เป็นการขยายผลจากค่าความเข้มข้นของสารตะกั่ว 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร มาทดลองต่อโดยใช้อัตรา 1,500 และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่า ตะกั่วจะสะสมได้สูงสุดในราก ลำต้นและใบ ร้าและแกลบ ตามลำดับ ส่วนข้าวขาวไม่พบการสะสมของตะกั่ว เมื่อนำส่วนรากที่ความเข้มข้นของสารตะกั่วต่าง ๆ ไปตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องผ่าน พบการสะสมของตะกั่วที่เวคิวโอล เอนโดพลาสมิก เรติคิวลัม และ ไซโทพลาสซึม
3. pot study เป็นการศึกษาโดยใช้เมล็ดข้าวที่มีตะกั่วสะสมอยู่จากการทดลอง batch study มาปลูกลงในดินที่ไม่มีการเติมสารตะกั่ว เพื่อศึกษาการถ่ายทอดตะกั่วจากรุ่นหนึ่งไปสู่อีกรุ่นหนึ่งหรือไม่ พบว่า มีการถ่ายทอดการสะสมของตะกั่วเข้าสู่ราก ลำต้นและใบ และร้า ส่วนแกลบและข้าวขาวไม่พบการสะสมของตะกั่ว

จากผลการทดลองทั้งสาม พบว่า ต้นข้าวสามารถดูดซับตะกั่วในดินได้ แต่ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นพืชบำบัดสารตะกั่วในดิน

คำนำ

ปัจจุบันนี้ประเทศไทยมีการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะด้านอุตสาหกรรมมีโรงงานต่างๆ เกิดขึ้นมากมายในบริเวณเขตภาคกลาง เช่น ปทุมธานี นครปฐม สุพรรณบุรี และอยุธยา โรงงานเหล่านี้เป็นตัวที่ก่อให้เกิดมลพิษในสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะโลหะหนัก เป็นสารมลพิษที่ก่อให้เกิดปัญหาในสิ่งแวดล้อมของประเทศอย่างมาก เช่น ตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักที่เป็นพิษต่อมนุษย์และสัตว์ในโรคของระบบประสาทส่วนกลาง และขัดขวางการสร้างฮีโมโกลบินของเม็ดเลือดแดง ในพืชตะกั่วจะไปยับยั้งการสร้างคลอโรพลาสต์ ซึ่งมีผลในการสังเคราะห์แสงของพืช

พื้นที่บริเวณภาคกลางเป็นแหล่งเพาะปลูกข้าวที่สำคัญของประเทศ นาข้าวของเกษตรกรส่วนใหญ่จะติดกับโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น โรงงานอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ โรงงานแบตเตอรี่ โรงพิมพ์ โรงงานทำสีทาสีบ้าน ซึ่งล้วนแต่มีการปล่อยตะกั่วออกสู่สิ่งแวดล้อมในความเข้มข้นที่ต่างกัน ข้าวจึงมีความเสี่ยงที่จะเกิดการปนเปื้อนตะกั่ว ผลผลิตของข้าวที่ออกมาจึงยังไม่ชัดเจนว่ามีตะกั่วตกค้างและปนเปื้อนอยู่หรือไม่ ถ้ามีตกค้างจะอยู่ในระดับที่เป็นอันตรายต่อผู้ที่บริโภคหรือไม่ เหตุผลอีกประการหนึ่งซึ่งน่าสนใจในเชิงการจัดการสิ่งแวดล้อมคือ สามารถตรวจสอบว่าข้าวมีคุณสมบัติที่ช่วยในการดูดซับหรือบำบัดตะกั่วที่ตกค้างอยู่ในดินได้ดีมากน้อยเพียงใด และตะกั่วจะไปสะสมอยู่ที่ส่วนใดของข้าวได้มากที่สุด ถ้าข้าวมีศักยภาพที่ดูดซับตะกั่วได้ดีก็จะเป็นพืชอีกตัวที่ช่วยบำบัดโลหะหนักและสารเคมีชนิดอื่นๆ ได้ อีกทั้งยังสอดคล้องกับแนวพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวที่ทรงเน้นให้มีการใช้พืชช่วยบำบัดฟื้นฟูสภาพแวดล้อมที่เสื่อมโทรมจากมลพิษ โดยใช้กระบวนการที่ไม่สลับซับซ้อน ทำได้ง่ายและ

ราคาถูก

การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ข้าว (Rice) เป็นพืชตระกูลหญ้าอยู่ใน phylum Gramineae อยู่ใน genus *Oryza* ใน species *sativa* มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa* เป็นข้าวที่ใช้ปลูกเป็นพืชอาหารของมนุษย์ (วรวิทย์, 2546) ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 เป็นข้าวนาปรัง ไร่ไม่ไถต่อช่วงแสง ต้นเดี่ยว ปลูกได้ตลอดปี ให้ผลผลิตที่สูงอาจมากถึงไร่ละ 100 ถัง เป็นข้าวที่ขึ้นในที่ลุ่มค่อนข้างชุ่มน้ำ มีน้ำขังตั้งแต่ 10-20 ซม. จึงเหมาะที่จะปลูกในภาคกลาง การใช้พื้นที่ชุ่มน้ำในการบำบัดโลหะหนัก ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำจะจับกับโลหะหนัก โดยกระบวนการดูดซับ (adsorption) การแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange) และการ chelation ส่วนในพืช โลหะหนักจะเข้าสู่ดินทางราก และมักสะสมอยู่บริเวณราก (Taylor และ Crowder, 1983) ไม่ค่อยเคลื่อนที่สู่ยอด มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่สะสมบริเวณโรโซม ลำต้น และใบ หรืออาจกล่าวได้ว่า มีการสะสมของโลหะหนักอยู่ในส่วนใต้ดินมากกว่าส่วนที่อยู่เหนือดิน (Mungur และคณะ, 1995)

Raskin (1997) ใช้วิธี Phytoremediation ในบริเวณที่มีการปนเปื้อนของเสียที่เป็นอันตราย พบว่าพืชสามารถดูดโลหะไปสะสมไว้ที่เนื้อเยื่อตามส่วนต่าง ๆ ของพืช และสามารถกำจัดได้อย่างง่ายดายด้วยการเผาและนำเถ้าไปฝัง Salt และคณะ (1995) ศึกษาว่า พืชที่ใช้ในวิธี Phytoextraction ความทนทาน และสามารถสะสมโลหะหนักในปริมาณที่สูงในส่วนต่าง ๆ แต่ก็เจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว และมีมวลชีวภาพ (biomass) ที่สูง Kumar และคณะ (1995) พบว่า *Brassica juncea* (indian mustard) มีการสะสมตะกั่วได้สูงที่สุดในบริเวณขอด และมีความทนทานต่อ Cd, Cr(VI), Ni, Zn, และ Cu นอกจากนี้ยังมีการใช้ *B. juncea* ดูดซับธาตุกัมมันตรังสีที่พบในดินบริเวณโรงงานนิวเคลียร์ Chernobyl ของ Ukraine พืชชนิดนี้สามารถสะสม Sr ในขอดได้มากถึง 3 เท่า ของข้าวโพด (*Zea mays*) (Salt และคณะ, 1995)

Dushenkov และคณะ (1995) ทดลองใช้ต้นทานตะวัน (*Helianthus annuus*) ดูดซับโลหะหนักจากสารละลายในห้องทดลอง พบว่า ภายใน 24 ชั่วโมง รากของต้นทานตะวันสามารถลดระดับของ Cr(VI), Mn, Cd, Ni, และ Cu ในน้ำได้ต่ำกว่าที่กำหนด Baker และคณะ (1991) เปรียบเทียบการทดลองในกระถางกับการทดลองในแปลงทดลอง พบว่า ผลการทดลองในกระถางไม่แปรปรวนเหมือนกับในแปลงทดลอง เพราะในแปลงทดลองมีปัจจัยต่าง ๆ เช่น แสง อุณหภูมิ ความชื้น และการแข่งขันจากพืชชนิดอื่น Skaar และคณะ (1979) ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านตรวจการสะสมของตะกั่วในแควิวโอล ไมโตรคอนเดรีย คลอโรพลาสต์ และ นิวเคลียส ของ *Rhytidadelphus squarrosus* จากประเทศนอร์เวย์

วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการสะสมของตะกั่วในราก ลำต้นและใบ และเมล็ดของข้าว
2. เพื่อศึกษาอาการภายนอกของข้าวเมื่อสะสมตะกั่วในปริมาณต่าง ๆ กัน
3. เพื่อประเมินศักยภาพของข้าวในการบำบัดตะกั่วในดิน
4. เพื่อศึกษาการถ่ายทอดของตะกั่วไปยังข้าวรุ่นถัดไป

ระเบียบวิธีวิจัย

1. การเตรียมหน่วยทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ CRD (Completely Randomized Design) มี ปัจจัย คือ (1) ตะกั่วที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน และกลุ่มควบคุม (2) ทดลองในเรือนกระจก ข้าวที่ใช้ทดลองเป็นเมล็ดข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ปลูกในถัง ถังละ 1 ต้น ทำการทดลอง 10 ซ้ำ การเติมตะกั่วจะเติมเพียงครั้งเดียวในตอนเริ่มทำการทดลอง

2. การเตรียมดิน

ดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินที่ใช้ปลูกข้าวในอำเภอกำแพงแสน

3. การเตรียมสารละลายตะกั่ว

ใช้ตะกั่วอะซิเตท (lead subacetate) ละลายในน้ำกลั่นที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน โดยต้องเตรียม stock solution แล้วทำการเจือจางที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

4. การตรวจอาการทางภายนอก (morphology)

สังเกตอาการของข้าวเมื่อได้รับสารตะกั่วที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน วัดมวลชีวภาพ (biomass) เปรียบเทียบกับหน่วยทดลองที่ควบคุม

5. การตรวจการสะสมของตะกั่วในราก ลำต้นและใบ และเมล็ดของข้าว

นำส่วนต่าง ๆ ของข้าวที่ได้รับตะกั่วทุกความเข้มข้นมาอบแห้งและแยกบด นำผงที่บดแล้วมาเติม 2M HCL และ 1M HNO₃ หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์โดยใช้ Atomic Absorption Spectrophotometer เพื่อหาตะกั่วในส่วนต่าง ๆ

6. การวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS วิเคราะห์ ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

เนื้อหางานวิจัย

ตอนที่ 1 preliminary test

วัตถุประสงค์ในการทดลองขั้น preliminary test

1. เพื่อศึกษาการสะสมของตะกั่วในราก ลำต้นและใบ และเมล็ดของข้าวและหาค่าความเข้มข้นของสารตะกั่วที่เหมาะสมเพื่อเลือกไปใช้ในการทดลองต่อไป
2. เพื่อศึกษาอาการภายนอกของข้าวเมื่อสะสมตะกั่วในปริมาณต่าง ๆ กัน
3. เพื่อประเมินศักยภาพของข้าวในการบำบัดตะกั่วในดิน

การดำเนินงานวิจัย

เพื่อตรวจหาความเข้มข้นของสารตะกั่วในเบื้องต้น เพื่อรู้ว่าต้นข้าวจะทนต่อการสะสมสารตะกั่วได้ถึงระดับใด และหาค่าความเข้มข้นของสารตะกั่วที่เหมาะสม ที่จะเลือกไปใช้ในการทดลองต่อไป

ทำ preliminary test ก่อนทำการทดลองจริง เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารตะกั่วที่ข้าวสามารถทนได้และพบในธรรมชาติจริง โดยใช้ดินนาหรือดินเหนียว 10 ก.ก. และใช้ ตะกั่วซัปปะอะซิเตด (lead subacetate) เตรียมเป็นสารละลายเข้มข้น 0, 2,500, 5,000, 7,500, 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทดสอบกับข้าวกระดังงาละ 1 ต้น ทดลอง 5 ซ้ำ เมื่อข้าวเริ่มแตกกอเติมสารตะกั่วลงในถังถังละ 1 ลิตร ทุก 5 วัน สังเกตอาการภายนอก จนกระทั่งเก็บผลผลิตครบทุกต้น ทำการตรวจหาค่าการสะสมของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ โดยเฉพาะในเมล็ดของต้นข้าว เลือกค่าความเข้มข้นของสารตะกั่วที่เหมาะสม ที่แสดงถึงการสะสมของตะกั่วไปยังเมล็ดที่มากที่สุด เพื่อทำการทดลองจริงต่อไป

ผลงานวิจัยอย่างย่อ

การตรวจสอบสภาพภายนอก (morphology) ของข้าว

ระยะที่ 1 ต้นกล้าจนถึงก่อนข้าวแตกกอ

ในช่วงแรกจะพบปัญหาเรื่องเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาลทำลายต้นกล้า จนต้องย้ายที่ทดลองใหม่ ทำให้ปัญหาเรื่องเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาลลดลง ข้าวจึงเจริญเติบโตทั้งทางลำต้นและใบดีขึ้น ใบเริ่มมีสีเขียวเข้ม ลำต้นแข็งแรงและเติบโตอย่างรวดเร็ว

ระยะที่ 2 ข้าวแตกกอ

มีการเติมสารตะกั่วที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ลงในดิน ทำให้การเติบโตของข้าวมีความแตกต่างกัน ข้าวที่เป็นกลุ่มควบคุม (0 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะมีแมลงศัตรูข้าวพวกบั่วทำลายยอดอ่อนของใบข้าว แมลงเหล่านี้ปากดูดแทงน้ำเลี้ยงที่โคนกอข้าว ทำให้ข้าวเหี่ยวแห้งตาย ส่วนกลุ่มทดลองจะพบปัญหาเกี่ยวกับโรคขอบใบแห้ง โรคใบสีส้ม และโรคใบสีแสด ทำให้เกิดการตาย สัปดาห์แรกที่เติมสารตะกั่ว ต้นข้าวแสดงอาการใบเหลืองที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป การเจริญเติบโตและการแตกกอหยุดชะงัก แต่เมื่อเวลาผ่านไป 2-3 สัปดาห์ ข้าวเริ่มปรับตัวต่อสารตะกั่วที่เติมลงไปได้ มีการแตกกอเพิ่ม และใบกลับมาเขียวอีกครั้ง แต่บางต้นยังมีอาการขอบใบแห้งและมีแนวโน้มจะตาย

ระยะที่ 3 ข้าวออกดอกและออกรวง

ข้าวในแต่ละถังมีการออกดอกและออกรวงในเวลาใกล้เคียงกัน ในกลุ่มควบคุมต้นข้าวที่เจริญเติบโตจะให้รวงข้าวประมาณ 6-8 รวง/ต้น ส่วนกลุ่มทดลองพบทั้งต้นข้าวที่เจริญเติบโตได้ดีออกรวงประมาณ 6-8 รวง/ต้น และต้นข้าวที่เจริญเติบโตได้ไม่ดีเพราะเกิดโรค และแมลงมากัดกินยอดอ่อนจะได้รวงประมาณ 4-6 รวง/ต้น และพบเมล็ดแห้ง ลีบ เป็นสาเหตุให้ไม่สามารถเก็บเมล็ดข้าวเพื่อไปวิเคราะห์หาค่าการสะสมของตะกั่วได้

การตรวจหาการสะสมของตะกั่วในราก ลำต้นและใบ และเมล็ดข้าว

ราก เป็นส่วนที่พบการสะสมของตะกั่วได้มากที่สุด รากสามารถสะสมตะกั่วได้สูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตะกั่ว วิเคราะห์ความแปรปรวนได้ค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของสารตะกั่วที่เติมลงในดินพบว่า ค่าความเข้มข้นของสารตะกั่วที่ 7,500 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นค่าที่มีความแตกต่างจากค่าอื่นอย่างมีนัยสำคัญ

ลำต้นและใบ มีการสะสมของตะกั่วได้น้อยกว่าราก แต่เมื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของสารตะกั่วที่เติมลงในดินพบว่า ค่าความเข้มข้นของสารตะกั่วที่ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นค่าที่มีความแตกต่างจากค่าอื่นอย่างมีนัยสำคัญ

กลีบ เป็นส่วนเปลือกของเมล็ดข้าว ตรวจหาค่าความเข้มข้นของสารตะกั่วที่สะสมในกลีบให้ค่าสะสมอยู่ในช่วง 14 - 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนจะพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) จึงไม่ได้นำไปหาค่า contrast coefficient แต่เมื่อพิจารณาจากค่าการสะสมของตะกั่วในตารางที่ 1 และ 2 พบว่า ค่าความเข้มข้นของสารตะกั่วที่ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นค่าที่มีการสะสมของตะกั่วได้สูงสุดเท่า ๆ กับที่ระดับเข้มข้นสูงกว่า

ข้าวสาร หรือข้าวกล้อง เป็นส่วนที่ใช้บริโภค นำมาทดสอบกับสารตะกั่วที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน พบว่า เมื่อเติมสารตะกั่วลงในดินที่ความเข้มข้นสูงขึ้น แต่การสะสมของตะกั่วในข้าวกล้อง ไม่ได้เพิ่มสูงขึ้นตาม ยังคงมีความจำกัดในการสะสมตะกั่วได้สูงสุดที่ 27.83 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่ความเข้มข้นของสารตะกั่ว 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน จะได้ค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ใช้เปรียบเทียบหาค่าความเข้มข้นของสารตะกั่วที่จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไปได้ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

การตรวจสอบสมบัติของดิน

พบว่าเป็นดินร่วนเหนียว มีอินทรียวัตถุในดินปานกลาง เมื่อนำไปทดสอบโดยเติมสารตะกั่วที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน พบว่า ดินมีการสะสมตะกั่วเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นของสารตะกั่วที่เติมลงไปโดยมีค่าก่อนข้างคองที่ความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมากกว่า เมื่อวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นำไปวิเคราะห์หา contrast coefficient เพื่อเปรียบเทียบหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไปได้ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร

ดังนั้นการทดลอง preliminary test สรุปได้ว่า การเติมสารตะกั่วที่ความเข้มข้น 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร/ถึง/ต้น จึงมีความเหมาะสมที่จะเลือกใช้ค่านี้ในการทดลองต่อไป

ตอนที่ 2 ขั้นตอนการทดลอง

หลังจากการทำ preliminary test พบว่าความเข้มข้นของสารตะกั่วที่ถูกเลือกใช้ในการทดลอง คือ 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงนำค่าที่ได้นี้มาแบ่งเป็น 2 ค่าที่ 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้การทดลอง 10 ซ้ำ เพื่อหาค่าการสะสมของสารตะกั่วในราก ลำต้นและใบ และเมล็ดของข้าว หลังจากได้ผลการทดลองในชุดที่ 1 แล้ว จึงนำเมล็ดข้าวที่เก็บจากชุดที่ 1 ไปปลูกเป็นชุดที่ 2 โดยไม่มีการเติมสารตะกั่วลงในดิน เพื่อเป็นการทดลองว่า สารตะกั่วที่สะสมอยู่ในเมล็ดข้าวของชุดที่ 1 สามารถถ่ายทอดตะกั่วไปสะสมในส่วนต่าง ๆ ของข้าวในชุดที่ 2 ได้หรือไม่

ทำการเพาะเมล็ดจนได้ต้นกล้าสูงประมาณ 3 ซม. และมีความแข็งแรงเพียงพอแล้ว จึงนำไปปลูกลงในถัง ถังละ 1 ต้น ปลูกจนกระทั่งข้าวเริ่มแตกกอ สำหรับชุดที่ 1 เติมสารตะกั่วลงในถังถังละ 1 ลิตร สังเกตอาการของต้นข้าวทุก 5 วัน จนกระทั่งเก็บเกี่ยวผลผลิตครบทุกต้น สำหรับชุดที่ 2 ดำเนินการปลูกเช่นเดียวกัน แต่ไม่มีการเติมสารตะกั่วลงในดิน

ผลการทดลอง

การตรวจสอบสภาพภายนอกของข้าว (morphology)

The batch study (ชุดที่ 1) ข้าวในกลุ่มควบคุม และกลุ่มทดลอง ในช่วง 1 เดือนแรก มีการเจริญเติบโตเป็นปกติ ใบมีสีเขียวเข้ม พอเริ่มเข้าเดือนที่ 2 ใบจะเริ่มเป็นด่างสีส้มในทั้งกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง ความสูงเฉลี่ยของต้นข้าวในทุกถังอยู่ที่ 1.4 เมตร น้ำหนักสดเฉลี่ย 0.8 กิโลกรัม เมื่อถึงเดือนที่ 3 ข้าวเริ่มออกรวง ใบข้าวของทุกกลุ่มเริ่มมีสีเหลืองซีด ยังคงมีการเติบโตปกติ ในกลุ่มควบคุมให้น้ำหนักเมล็ดข้าวเฉลี่ย 185 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นของสารตะกั่ว 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 194 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นของสารตะกั่ว 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 195 กรัม ต้นข้าวทุกต้นยังคงเจริญเติบโตและให้ผลผลิตอย่างต่อเนื่อง หลังจากเก็บเกี่ยวเมล็ดข้าวแล้ว ทำการเก็บต้นข้าวและเก็บดินเพื่อนำไปวิเคราะห์หาตะกั่วที่ตกค้างต่อไป

The pot study (ชุดที่ 2) ต้นข้าวในชุดนี้ทุกถังไม่มีการเติมสารตะกั่ว แต่นำเมล็ดจากข้าวชุดที่ 1 มาปลูกลงในดินที่มีคุณสมบัติเดียวกัน พบว่า ต้นข้าวทั้งในกลุ่มควบคุม และกลุ่มทดลอง มีการเจริญเติบโตได้ดีเป็นปกติ ใบมีสีเขียวสด มีความสูงเฉลี่ย 1.5 เมตร น้ำหนักสดทั้งต้นเฉลี่ย 1.1 กิโลกรัม ข้าวในชุดนี้จะมีการเจริญเติบโตทางใบมาก แต่ผลผลิตน้ำหนักเมล็ดข้าวเฉลี่ยจะไม่สูง ถ้าคิดน้ำหนักเมล็ดข้าวเฉลี่ยในกลุ่มควบคุมเท่ากับ 77 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นของสารตะกั่ว 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 69 กรัม ที่ระดับความเข้มข้นของสารตะกั่ว 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 61 กรัม

การตรวจหาการสะสมของตะกั่วในราก ลำต้นและใบ และเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าวที่ใช้ในการทดลองเป็นเมล็ดข้าวชุดเดียวกับที่ทำ preliminary test ซึ่งเป็นเมล็ดข้าวที่ได้จากแปลงทดลองข้าวของสถาบันวิจัยข้าว (ชื่อที่เรียกขณะนั้น) เป็นข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ซึ่งให้ผลผลิตสูง มีความต้านทานต่อโรคและแมลงได้สูง นิยมปลูกกันมากในภาคกลาง

นำเมล็ดข้าวที่จะทดลองไปวิเคราะห์หาค่าตะกั่ว พบว่ามีความเข้มข้น 4.78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นำต้นกล้าที่เพาะไว้ไปปลูกในถังถังละ 1 ต้น

The batch study (ชุดที่ 1) หลังจากข้าวแตกกอจึงเติมสารตะกั่วที่ความเข้มข้น 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สังเกตอาการทุก 5 วัน จนกระทั่งข้าวออกรวง และเก็บเกี่ยวครบหมดทุกต้น จึงนำข้าวไปวิเคราะห์หาตะกั่วเป็นส่วนดังนี้

ราก เป็นส่วนที่สะสมตะกั่วได้ดีที่สุด การสะสมตะกั่วในรากจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารตะกั่วที่เติมลงไป คือ ตะกั่วจะสะสมในรากได้มากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มสูงขึ้นอย่างมี

นัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งในกลุ่มควบคุม และกลุ่มทดลอง (รูปที่ 1) เมื่อหาค่า coefficient of variation (C.V.) ของรากจะได้เท่ากับ 8 %

ลำต้นและใบ เป็นส่วนที่มีการสะสมตะกั่วได้น้อยกว่าราก การสะสมของตะกั่วในส่วนลำต้นและใบ จะแปรผันตรงกับค่าความเข้มข้นของตะกั่ว คือ ตะกั่วที่สะสมในลำต้นและใบได้มากขึ้นแปรผันตามความเข้มข้นที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งในกลุ่มควบคุม และกลุ่มทดลอง

(รูปที่ 2) เมื่อนำส่วนนี้ไปหาค่า coefficient of variation (C.V.) จะได้เท่ากับ 62 %

นำเมล็ดข้าวที่เก็บจากดินข้าวทุกต้นมาวิเคราะห์หาค่าการสะสมตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของเมล็ด ดังนี้ **ข้าวขาว** เป็นส่วนของเมล็ดข้าวที่กะเทาะเอาเปลือกออก และทำการขัดขาว โดยแยกเอาส่วนที่เป็นจมูกข้าวออก เมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าการสะสมตะกั่ว จะไม่พบการสะสมของตะกั่วในส่วนนี้

แกลบ คือเปลือกที่ถูกกะเทาะออกมาจากเมล็ด มักใช้ในการเกษตรกรรม เช่น การเพาะเลี้ยงเห็ด เมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าไม่มีความแตกต่างที่ค่าความเชื่อมั่น ($p \leq 0.05$) อย่างมีนัยสำคัญ นำส่วนนี้ไปหาค่า coefficient of variation (C.V.) จะได้เท่ากับ 237 % **รำ** เป็นส่วนที่ถูกขัดออกจากเมล็ดข้าว มักใช้เพื่อการเลี้ยงสัตว์ บางทีเรียกว่าจมูกข้าว เป็นส่วนที่มีดินอ่อนเจริญเติบโต จึงเป็นส่วนที่สะสมสารอาหารไว้มาก เมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าไม่มีความแตกต่างที่ค่าความเชื่อมั่น ($p \leq 0.05$) อย่างมีนัยสำคัญ นำส่วนนี้ไปหาค่า coefficient of variation (C.V.) จะได้เท่ากับ 22 %

The pot study (ชุดที่ 2) เป็นชุดที่นำเมล็ดข้าวจากชุดที่ 1 ทั้ง 30 ต้น มาปลูกในดินที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน โดยไม่มีการเติมสารตะกั่วลงในดิน ปลูกจนกระทั่งต้นข้าวออกรวง และเก็บเมล็ดข้าวได้ทุกต้น จากนั้นทำการนำส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวไปวิเคราะห์หาค่าตะกั่วที่สะสมในส่วนต่าง ๆ ดังนี้ **ราก** ต้นข้าวยังคงสะสมตะกั่วได้มากที่สุดที่ส่วนราก ในกลุ่มควบคุม ยังพบการสะสมของตะกั่วได้ 12.82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนกลุ่มทดลองโดยนำเมล็ดที่เก็บมาจากดินที่ปลูกในความเข้มข้น 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าไม่มีความแตกต่างที่ค่าความเชื่อมั่น ($p \leq 0.05$) อย่างมีนัยสำคัญ นำส่วนนี้ไปหาค่า coefficient of variation (C.V.) จะได้เท่ากับ 28 %

ลำต้นและใบ ในชุดที่ 2 นี้ยังพบการสะสมของตะกั่วในส่วนลำต้นและใบในทุกความเข้มข้น แต่พบในปริมาณที่ไม่มาก เมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าไม่มีความแตกต่างที่ค่าความเชื่อมั่น ($p \leq 0.05$) อย่างมีนัยสำคัญ นำส่วนนี้ไปหาค่า coefficient of variation (C.V.) จะได้เท่ากับ 29 %

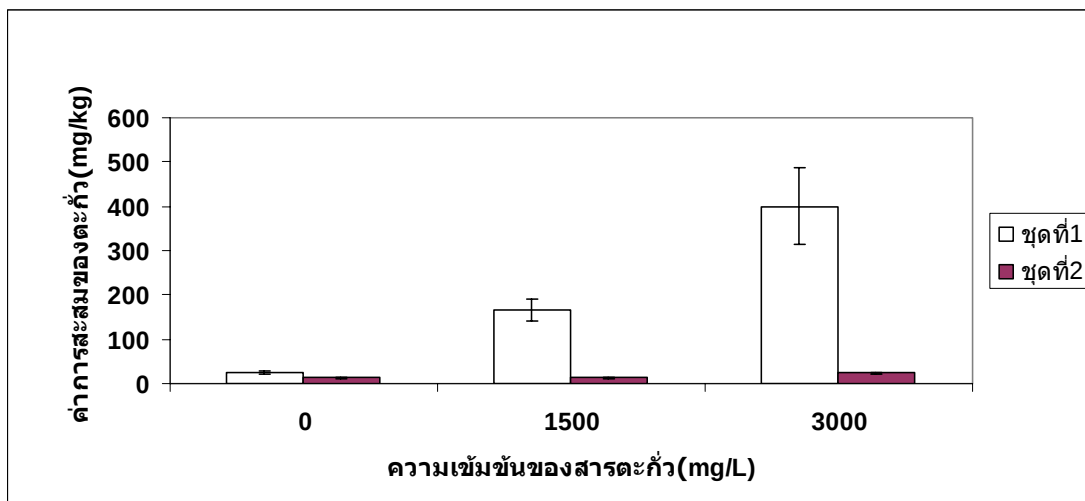
ในส่วนเมล็ดข้าวที่เก็บเมล็ดมาจากชุดที่ 1 ที่ความเข้มข้นของตะกั่วต่าง ๆ กัน เมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าตะกั่ว โดยแยกส่วนของเมล็ดไปวิเคราะห์ พบว่าไม่สามารถตรวจพบตะกั่วในส่วนของข้าวขาวและแกลบ แต่พบการสะสมของตะกั่วในส่วนของรำ ดังนี้

รำ พบการสะสมของตะกั่วในส่วนนี้ในปริมาณน้อย เมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าตะกั่วที่สะสมในกลุ่มควบคุมจะมีปริมาณ 0.63 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนกลุ่มทดลองตะกั่วที่ความเข้มข้น 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 0.79 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 1.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ จะพบว่าค่าการสะสมของตะกั่วในรำไม่เกินค่ามาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน 1 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม จึงไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค เมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าไม่มีความแตกต่างที่ค่าความเชื่อมั่น ($p \leq 0.05$) อย่างมีนัยสำคัญ นำส่วนนี้ไปหาค่า coefficient of variation (C.V.) จะได้เท่ากับ 102 %

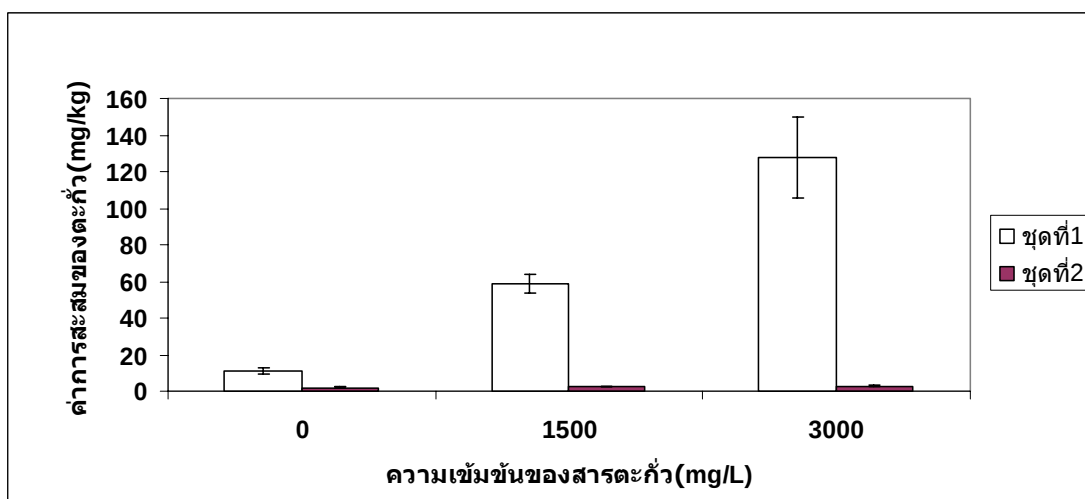
ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยการสะสมของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าว

ความเข้มข้นของ ตะกั่ว (mg/L)	ความเข้มข้นของตะกั่ว (mg/kg)											
	ราก		ลำต้นและใบ		รำ		แกลบ		ข้าวขาว		ดิน	
	รุ่น 1	รุ่น 2	รุ่น 1	รุ่น 2	รุ่น 1	รุ่น 2	รุ่น 1	รุ่น 2	รุ่น 1	รุ่น 2	รุ่น 1	รุ่น 2
0	24.89±2.34	12.82±0.88	10.99±1.55	1.98±0.26	5.44±0.23	0.63±0.16	0.01±0.01	ND	ND	ND	1.59±0.07	ND
1500	165.91±24.94	12.49±0.59	58.7±4.9	2.66±0.21	5.99±0.54	0.79±0.34	0.43±0.26	ND	ND	ND	12.63±3.53	ND
3000	400.48±86.67	23.85±2.30	127.68±21.83	2.95±0.23	5.3±0.32	1.00±0.26	0.19±0.85	ND	ND	ND	16.06±4.54	ND

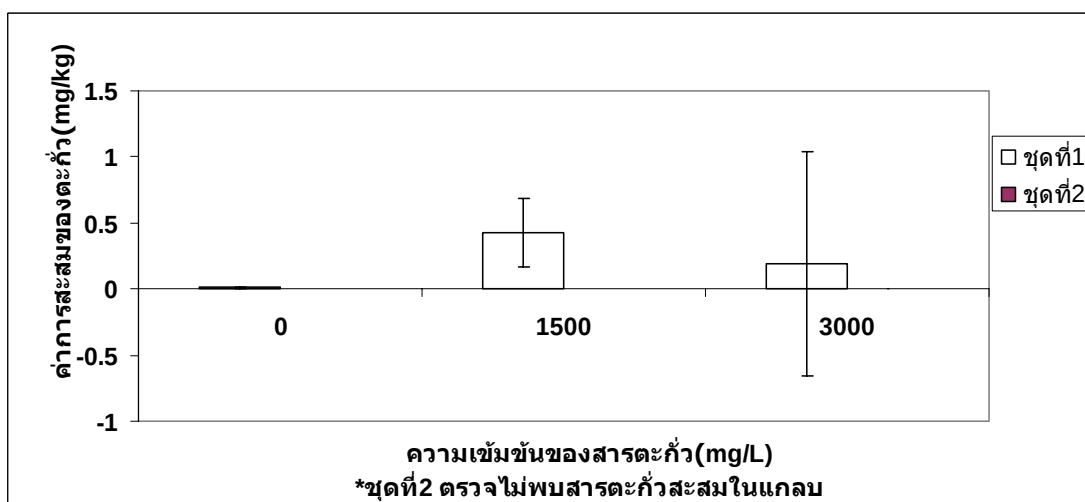
- ค่าเฉลี่ยจาก 10 ซ้ำกับค่า standard error
- ND = ตรวจไม่พบ



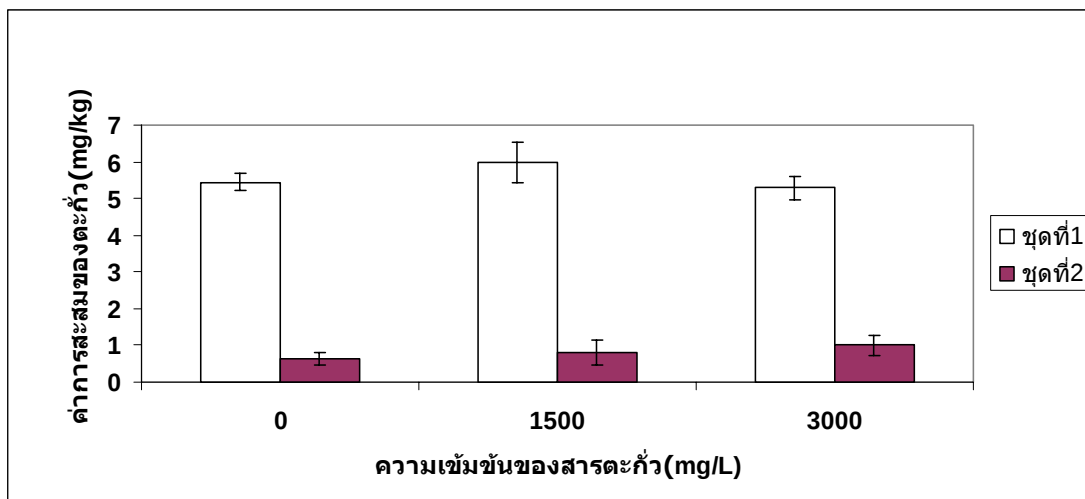
รูปที่ 1 การสะสมของตะกั่วในรากของต้นข้าว



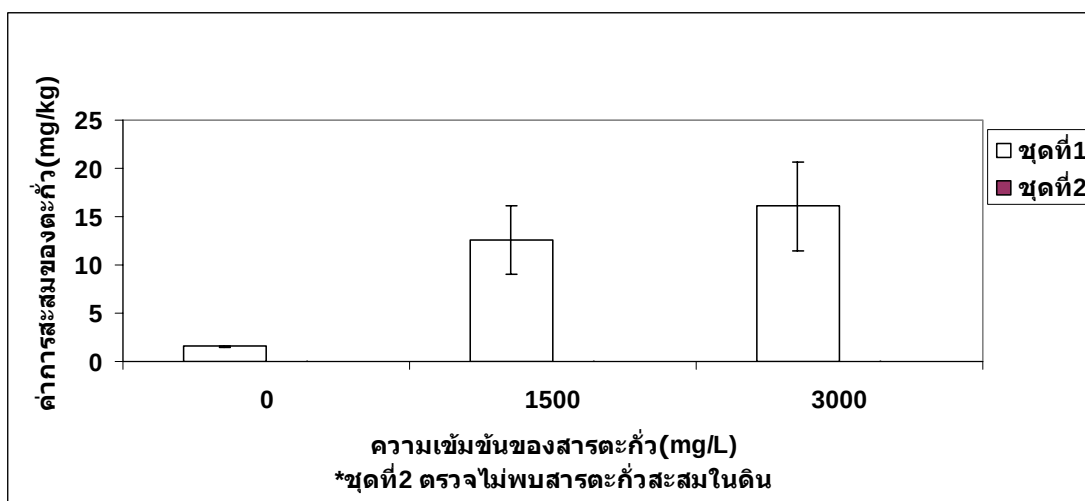
รูปที่ 2 การสะสมของตะกั่วในลำต้นและใบของต้นข้าว



รูปที่ 3 การสะสมของตะกั่วในแกลบของต้นข้าว



รูปที่ 4 การสะสมของตะกั่วในรากของต้นข้าว



รูปที่ 5 การสะสมของตะกั่วในดิน

การตรวจสอบคุณสมบัติของดิน

ได้มีการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินดังตารางที่ 2 นำดินที่จะใช้ในการทดลองปลูกข้าวของชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ไปวิเคราะห์หาค่าตะกั่ว พบว่าไม่สามารถหาค่าตะกั่วที่สะสมอยู่ในดินสำหรับการทดลองได้ เมื่อสิ้นสุดการทดลองทั้งชุดที่ 1 และชุดที่ 2 นำดินไปวิเคราะห์หาค่าการสะสมของตะกั่วพบดังตารางที่ 1 คือค่าการสะสมของตะกั่วในดินของชุดที่ 1 มีการเพิ่มขึ้นแปรผันตามความเข้มข้นของสารตะกั่วที่เติมลงในดินในระยะที่ต้นข้าวแตกกอ ส่วนในชุดที่ 2 ไม่มีการเติมสารตะกั่วลงในดิน เมื่อสิ้นสุดการทดลอง นำดินไปวิเคราะห์หาค่าตะกั่ว จะไม่พบตะกั่วสะสมอยู่ในดิน นำดินชุดที่ 1 ไปวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อวิเคราะห์หาค่า coefficient of variation (C.V.) จะได้เท่ากับ 104 %

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน

คุณสมบัติของดิน	ค่าที่วิเคราะห์ได้	ความหมายของค่าวิเคราะห์
เนื้อดิน	ดินเหนียว	
ความเป็นกรดต่าง (pH)	6.61	เป็นกลาง
ค่าการนำไฟฟ้า (dS/m)	1.22	ดินไม่เค็ม
ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (%)	1.89	ปานกลาง
ความจุแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cmo/kg)	18.73	ค่อนข้างสูง
ค่าตะกั่วที่สะสมในดิน (mg/kg DW)	ND	ตรวจไม่พบ

การประเมินศักยภาพของข้าวในการบำบัดตะกั่วในดิน

หาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับโลหะหนักของพืช โดยนิยามคิดเปรียบเทียบจากค่าสัมประสิทธิ์การสะสมสารพิษของพืช (phytoextraction coefficient) โดยพืชให้ค่าสัมประสิทธิ์ในท่ทุกส่วนตั้งแต่ 0.5-1.0 แสดงว่า พืชมีความสามารถในการดูดซับสามารถใช้เป็นพืชทดลองได้ แต่ถ้าได้ค่าสัมประสิทธิ์ในท่ทุกส่วนของพืชสูงกว่า 10 แสดงว่า เป็นพืชที่มีความสามารถดูดซับสารพิษได้สูง (hyperaccumulation) เหมาะที่จะใช้เป็นตัวดูดซับสารต่าง ๆ สำหรับการทดลอง จากการทดลองพบว่า ชูดที่ 1 สามารถนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์ได้ดังตารางที่ 3 ในส่วนของรากมีความสามารถดูดซับตะกั่วได้สูงกว่าส่วนอื่น ส่วนลำต้นและใบจัดว่ามีประสิทธิภาพที่จะใช้ในการดูดซับตะกั่วได้ดี แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของเมล็ด ทั้งในแกลบและในรำพบว่า ไม่มีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วได้ ดังนั้นจึงไม่จัดต้นข้าวให้เป็นพืชที่เหมาะสมกับการนำไปบำบัดตะกั่วในดิน เพราะค่าสัมประสิทธิ์ใช้ได้ดีไม่ครบท่ทุกส่วนในการทดลอง

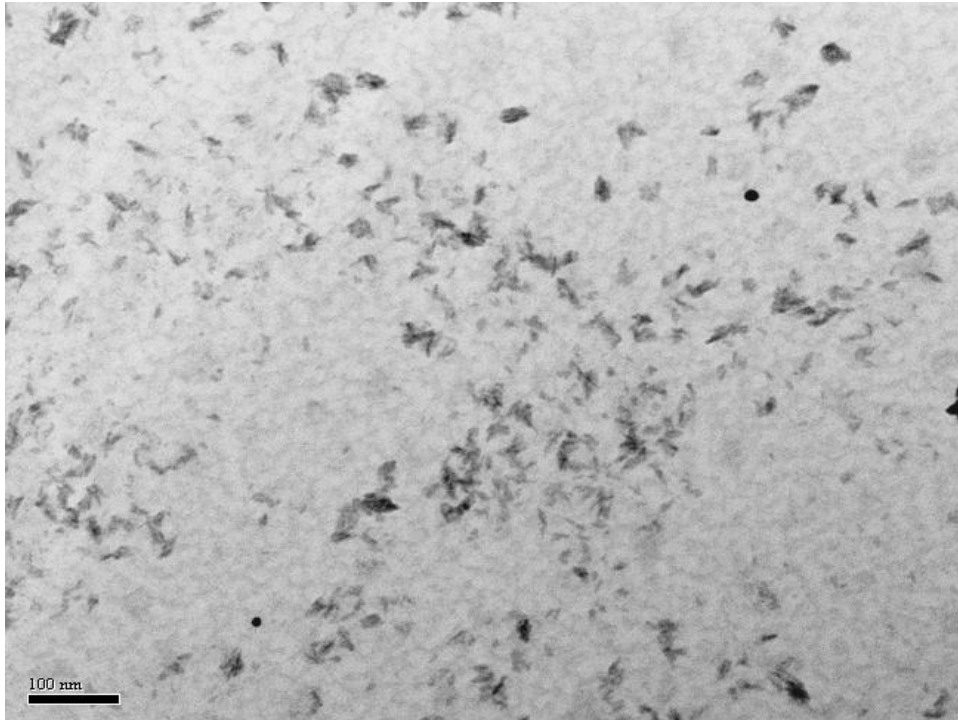
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวชุดที่ 1

ความเข้มข้นของตะกั่ว (mg/L)	ประสิทธิภาพ				
	ราก	ลำต้น	ร้ำ	กลีบ	ข้าวขาว
0	15.65	6.91	3.42	0.01	-
1500	13.14	4.65	0.47	0.03	-
3000	24.94	7.95	0.33	0.01	-

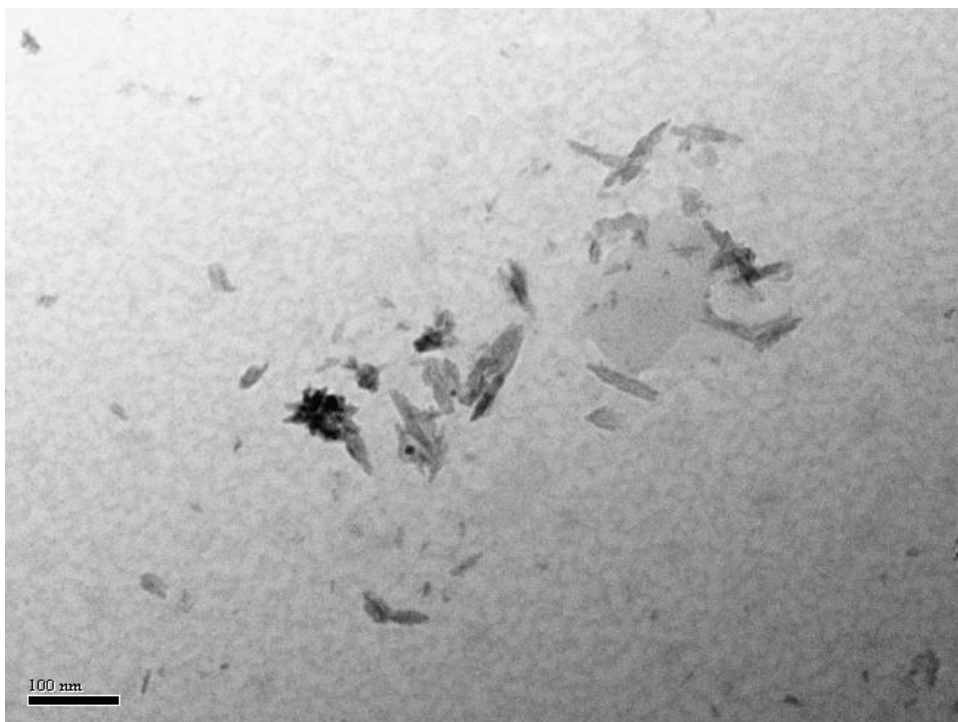
ดังนั้นต้นข้าวในชุดที่ 2 ไม่ได้เติมสารตะกั่วลงในดิน เมื่อนำดินไปวิเคราะห์หาตะกั่วพบว่า เป็น ND คือ ตรวจไม่พบ จึงไม่สามารถนำมาหาค่าประสิทธิภาพการดูดซับสารตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของข้าวชุดที่ 2 ได้

การตรวจด้วยกล้อง TEM (Transmission Electron Microscope)

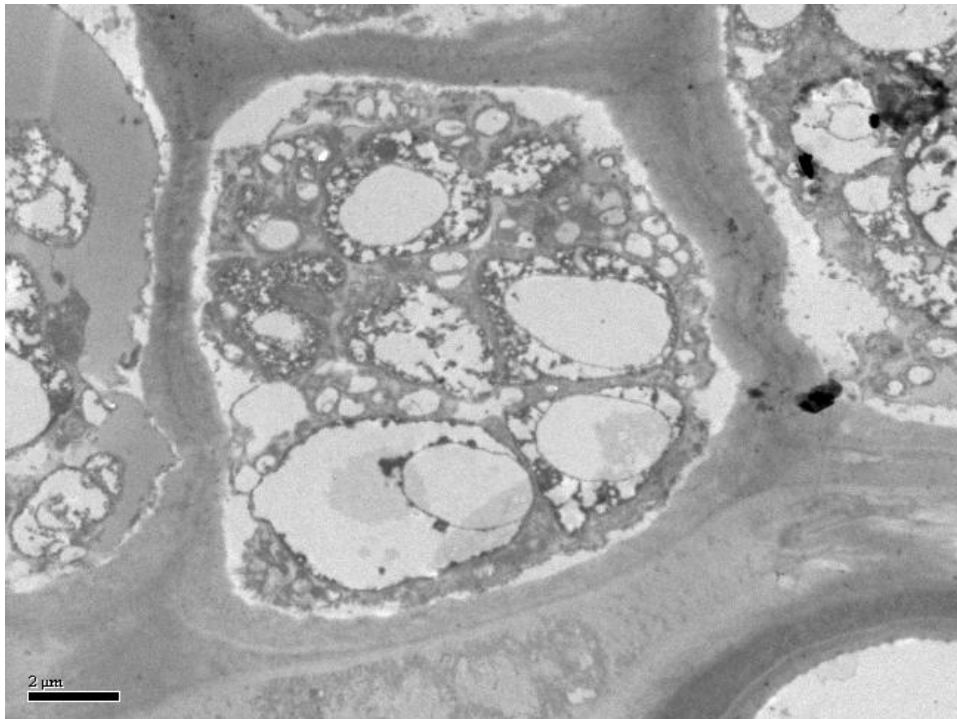
เลือกรำจากกลุ่มทดลองที่มีการสะสมของตะกั่วได้มากที่สุด และรำจากกลุ่มควบคุมมาตรวจหาตะกั่วด้วยกล้อง TEM ก่อนที่จะทำการตรวจดูการสะสมของตะกั่วภายในเซลล์ นำสารละลายตะกั่วไปทำ dip preparation (รูปที่ 1) เพื่อดูลักษณะของตะกั่ว พบว่าตะกั่วมีลักษณะเป็นเกล็ดเรียวยาว (รูปที่ 2) เมื่อนำรำในชุดควบคุมไปตรวจด้วย TEM จะพบเซลล์และผนังเซลล์ที่เป็นปกติ (รูปที่ 3) และบริเวณเอนโดพลาสมิก เรติคูลัม (endoplasmic reticulum) และ แวกิวโอล (vacuole) ก็ไม่มีการสะสมของตะกั่วที่บริเวณนี้ (รูปที่ 4) เมื่อนำรำที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร มาตรวจด้วย TEM พบว่า ตะกั่วจะไปสะสมอยู่บริเวณเอนโดพลาสมิก เรติคูลัม (endoplasmic reticulum) (รูปที่ 5) และบริเวณ แวกิวโอล (vacuole) มีการสะสมของตะกั่วในปริมาณมาก (รูปที่ 6) เมื่อนำรำที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มาตรวจด้วย TEM พบว่า ตะกั่วจะไปสะสมอยู่มากที่ไซโตพลาสซึม (cytoplasm) (รูปที่ 7) และบริเวณที่ใกล้แวกิวโอล (vacuole) ก็จะพบการสะสมของตะกั่ว (รูปที่ 8)



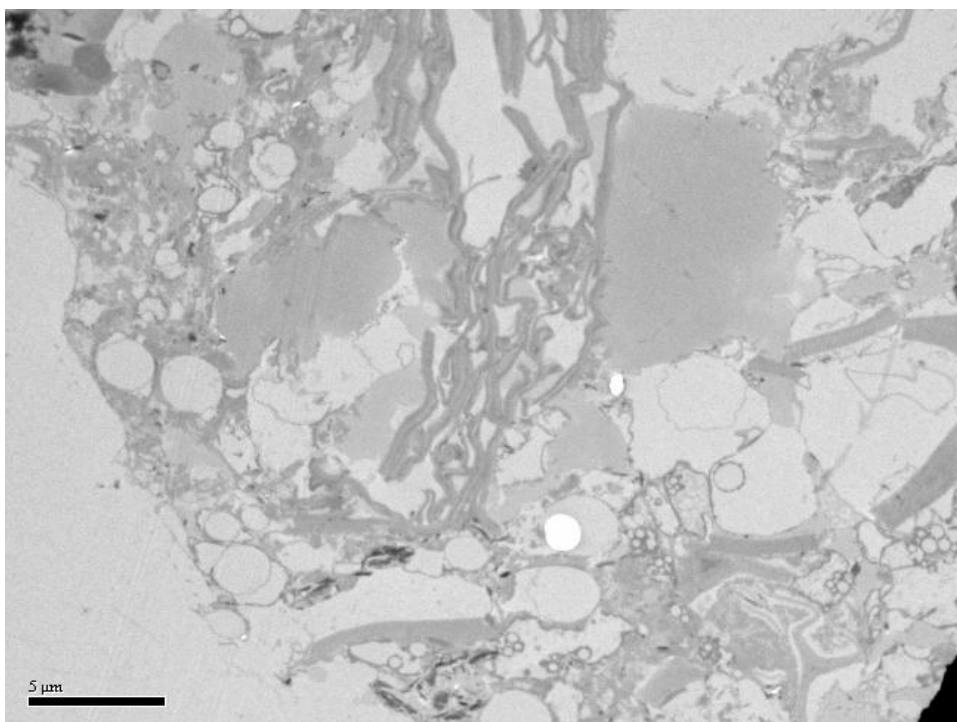
รูปที่ 1 แสดงรูปร่างของตะกั่วจากการทำ dip preparation



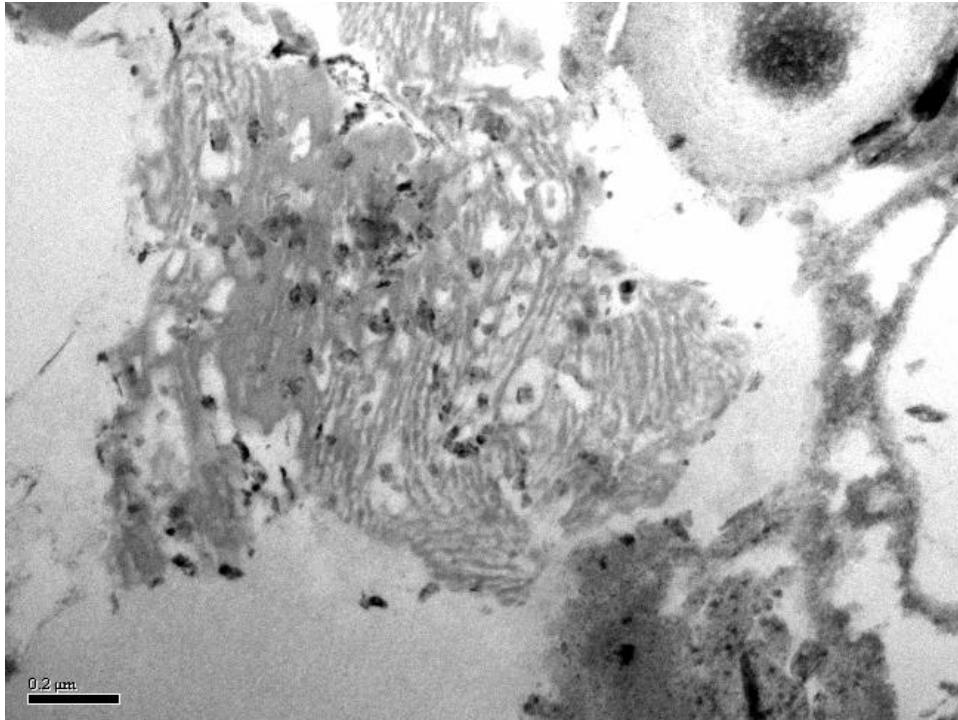
รูปที่ 2 แสดงลักษณะของตะกั่วที่เป็นเกล็ดเรียวยาว



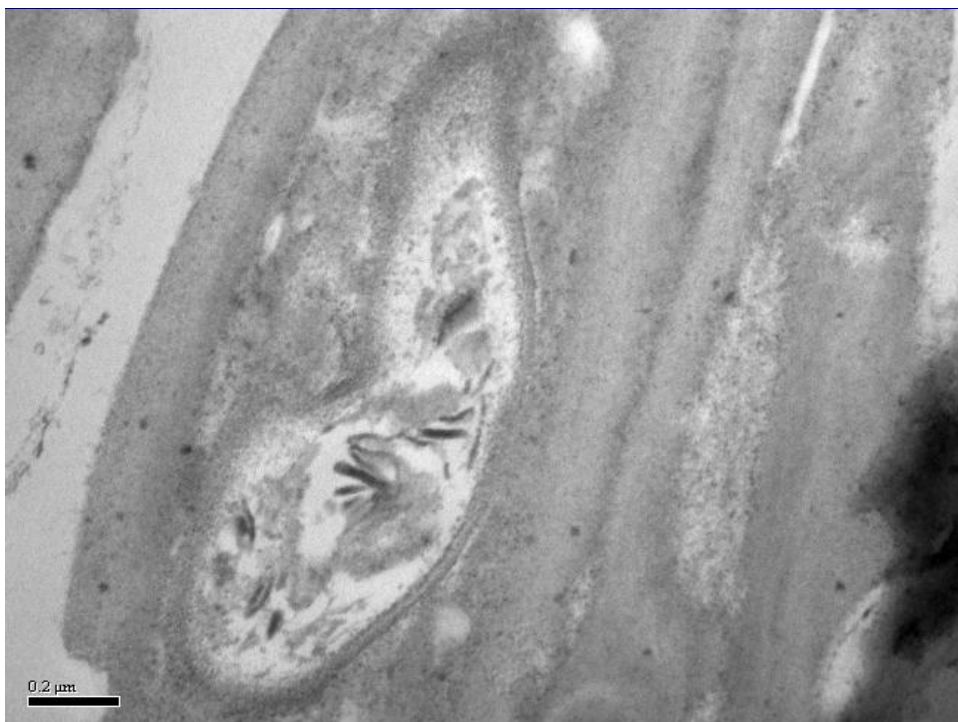
รูปที่ 3 แสดงลักษณะเซลล์ลำข้าวที่เป็นปกติของกลุ่มควบคุม



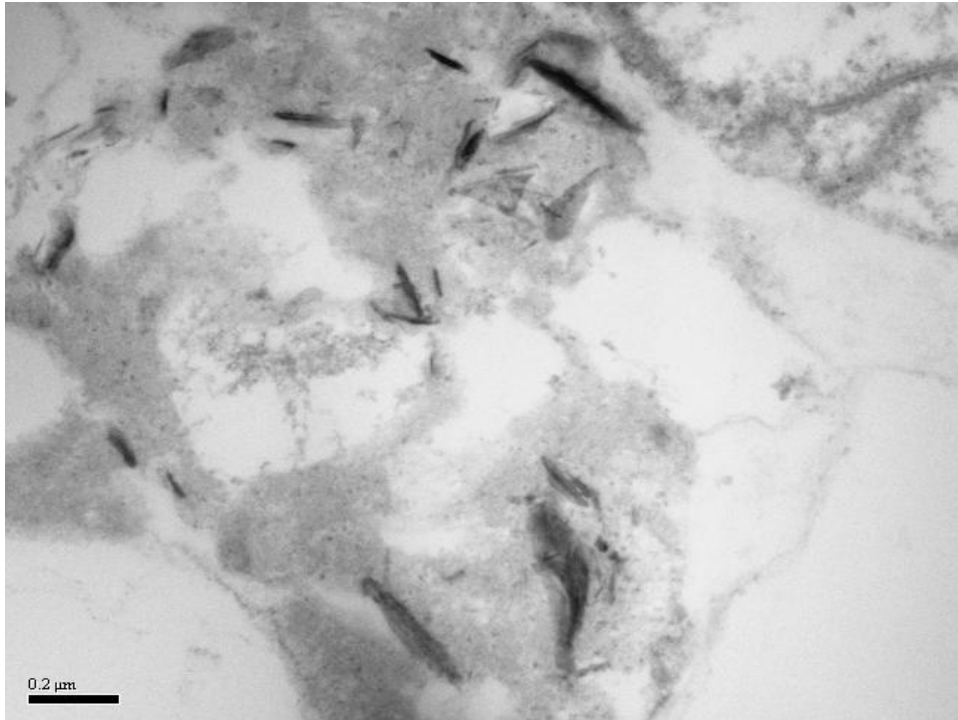
รูปที่ 4 แสดงลักษณะออร์แกเนล (organelle) ที่เป็นปกติของลำข้าวในกลุ่มควบคุม



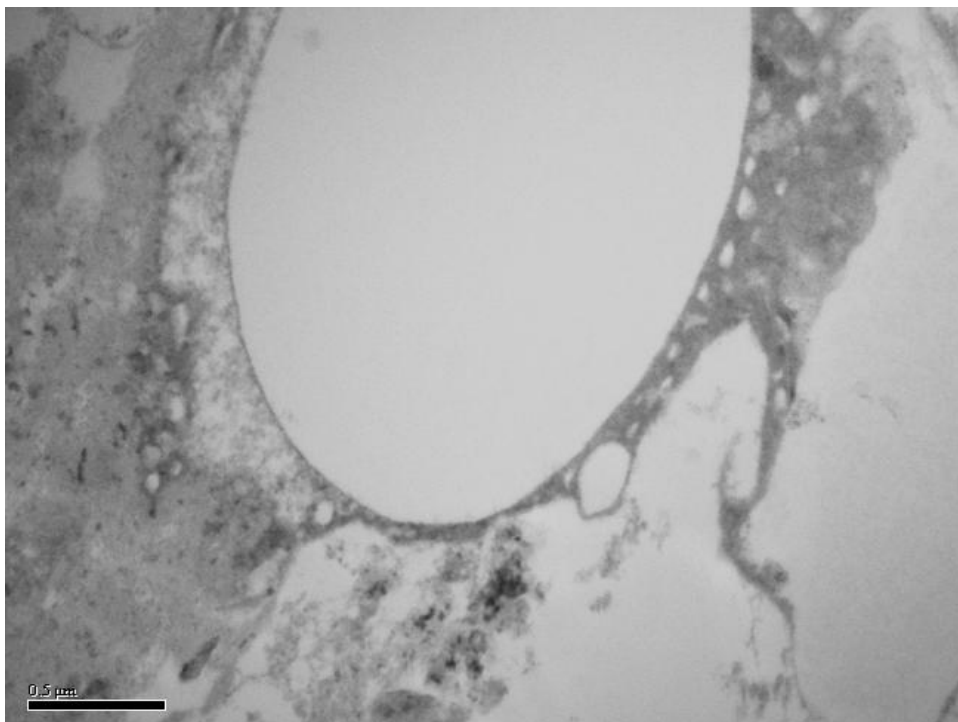
รูปที่ 5 แสดงการสะสมของตะกั่วที่เอนโดพลาสมิก เรติคูลัม (endoplasmic reticulum)



รูปที่ 6 แสดงการสะสมของตะกั่วที่แวคิวโอล (vacuole)



รูปที่ 7 แสดงการสะสมของตะกั่วที่ไซโทพลาสซึม (cytoplasm)



รูปที่ 8 แสดงการสะสมของตะกั่วในแวคิวโอล (vacuole)

สรุปผลการทดลอง

1. ต้นข้าวจะสะสมตะกั่วได้มากที่สุดในส่วนของราก ลำต้นและใบ และร่าตามลำดับ ในส่วนข้าวขาวจะไม่พบการสะสมของตะกั่วทั้งใน ชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 ส่วนในแถบพบการสะสมของตะกั่วในปริมาณที่น้อยในชุดที่ 1 ส่วนชุดที่ 2 ไม่พบการสะสมของตะกั่วในส่วนนี้
2. ในเมล็ดพบว่าการสะสมของตะกั่วมากที่สุดในรำ เมื่อนำไปตรวจด้วยกล้อง TEM พบว่า ตะกั่วจะมีการสะสมมากที่สุดที่แควิวโอล และจะพบการสะสมตะกั่วจากความเข้มข้น 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เอนโดพลาสมิก เรติคูลัมมากที่สุด ส่วนที่ไซโตพลาสซึมจะพบการสะสมตะกั่วจากความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่า การสะสมของตะกั่วในเมล็ดข้าวจะไม่เป็นพิษต่อผู้บริโภค พบว่า มีการถ่ายทอดการสะสมของตะกั่วจากข้าวรุ่นที่ 1 ไปสู่ข้าวรุ่นที่ 2 ได้มากในราก ลำต้นและใบ ส่วนในเมล็ดจะมีการสะสมตะกั่วจากข้าวรุ่นที่ 1 สู่ข้าวรุ่นที่ 2 ได้เล็กน้อยในรำ แต่ในแถบไม่พบการสะสมแบบถ่ายทอดจากรุ่นที่ 1 สู่รุ่นที่ 2 และในข้าวขาวจะไม่พบการสะสมของตะกั่วทั้งในรุ่นที่ 1 และรุ่นที่ 2 แสดงให้เห็นว่าตะกั่วไม่สะสมถ่ายทอดในเมล็ดจากรุ่นที่ 1 สู่รุ่นที่ 2 แม้ว่าจะมีการปนเปื้อนตะกั่วในดินสูงก็ตาม
4. ข้าวมีความสามารถดูดซับสารตะกั่วได้ แต่ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นพืชที่บำบัดสารตะกั่วที่ตกค้างในดิน
5. การนำฟางข้าวไปเลี้ยงสัตว์ ควรพิจารณาเพราะตะกั่วส่วนใหญ่สะสมได้ดีในส่วนราก ลำต้นและใบ อีกทั้งยังมีการถ่ายทอดการสะสมตะกั่วจากรุ่นที่ 1 สู่รุ่นที่ 2 ได้
6. ตะกั่วไม่มีผลต่อการตายของข้าวทั้งในรุ่นที่ 1 และรุ่นที่ 2 แต่ต้นข้าวจะเจริญเติบโตได้ไม่ดีมาก ถ้าในดินนั้นมีตะกั่วสะสมในปริมาณที่สูง ต้นข้าวจะตายจากสาเหตุการเป็นโรคและแมลงมารบกวน ผลผลิตของข้าวในรุ่นที่ 2 มีผลผลิตที่สูงกว่าข้าวในรุ่นที่ 1

Output ที่ได้จากโครงการ

1. ข้าวสามารถดูดซับสารตะกั่วได้น้อย ซึ่งไม่เหมาะที่จะใช้เป็นตัวบำบัดสารพิษในดิน
2. ตะกั่วสามารถสะสมได้ในทุกส่วนของต้นข้าว โดยสะสมได้มากที่สุดในราก ลำต้นและใบ รำ และแกลบ
3. จะพบการสะสมของตะกั่วในเซลล์ที่บริเวณแวกคิวโอล เอนโดพลาสมิก เรติคูลัม และไซโตพลาสซึม
4. ไม่พบตะกั่วในข้าวที่ขัดขาว
5. การนำฟางข้าวไปเลี้ยงสัตว์ควรต้องพิจารณาถึงพิษของตะกั่วด้วย

ภาคผนวก

Partitioning of lead accumulation in rice plant

Thanawan Panich-pat^{a*} and Peerasak Srinives^b

^aFaculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand E-mail:faastwp@ku.ac.th

^bDepartment of Agronomy, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand E-mail:agrps@yahoo.com

Introduction

Lead is a heavy metal considered highly toxic to human and animals. Rice may be contaminated by lead. So far, there was no report regarding the harm of lead contaminated rice to consumers, but this does not mean that there is no lead contamination in rice. A basic knowledge in lead accumulation in rice would be beneficial and essential to rice marketing in the future. The knowledge can help monitoring lead contamination in the paddy fields in Thailand. Thus, this experiment is aiming to study lead accumulation in roots, shoots and seeds in rice and its ability to remove lead from contaminated soils.

Materials and Methods

1. Plant and soil preparation

Rice seed cv. 'Pathum Thani 1' was obtained from the Rice Research Institute, Bangkok. The soil used was air-dried for 2 days, mixed and placed in buckets. A total of 10 kg dry soil was put in with each bucket, added with tap water and mixed well until muddy. Altogether 25 buckets were prepared, each sown with 1 rice plant.

Table 1. Physical and chemical characteristics of the experimental soil.

Soil properties	Analytical results
Texture	Loamy clay
Soil pH	7.07
Organic matter (%)	2.43
CEC (cmol/kg)	19.43
EC (Ds/m)	0.46
Total soil Pb (mg kg ⁻¹)	0.17

2. Lead concentrations

The concentrations of lead subacetate solution used were 2500, 5000, 75000, and 10000 mgL⁻¹.

3. Plant organ analysis

Plants were morphologically divided into 4 parts of roots, stems and leaves, husk, and brown rice. Each part was cut, ground and dried for 2 days at 80° C. Lead concentrations in samples were determined with a flame atomic absorption spectrophotometer (FAAS).

4. Phytoextraction coefficients

The amount of metal extractable from plant tissue was reported as phytoextraction coefficient, i.e., the ratio of metal concentration in the tissue (g metal/g dry weight of tissue) to the initial soil concentration of the metal (g metal/g dry weight of soil) (PRA, 2000).

Conclusions

The highest lead accumulation was found in husk and brown rice at the concentration of lead subacetate 2500 mgL⁻¹. Most of rice plants still showed normal growth. Although some plants died prematurely. It was probably resulted from certain rice diseases.

Results and Discussion

1. Lead accumulation

The rice seeds were analyzed prior to sowing which showed a small degree of lead contamination at 29.79 mg Pb kg⁻¹. Among different concentrations of lead, there were difference in lead accumulation in stems and leaves, roots and brown rice, but not in husk. The data were further analyzed by contrast coefficients and showed that the 2500 mgL⁻¹ lead subacetate treatment gave the highest accumulation of lead in rice seed. Thus, the 2500 mgL⁻¹ concentration was chosen for further study on lead accumulation in various parts of rice plant.

In the soil, there was significant difference ($p \leq 0.05$) in lead concentration, although the coefficient of variation (cv) was rather high at 48 %.

Table 2. the average lead concentration (mg kg⁻¹) in various parts of the rice plants and in the soils.

Pb concentration (mgL ⁻¹)	Pb accumulation in mg kg ⁻¹ dry weight				
	Roots	Stems and leaves	Husk	Brown rice	Soil
0	13.98 ± 3.64	5.60 ± 2.04	14.73 ± 3.2	13.32 ± 1.82	0.23 ± 0.21
2500	97.03 ± 26.73	13.58 ± 4.13	20.44 ± 4.42	27.83 ± 5.13	7.52 ± 3.07
5000	112.87 ± 9.77	65.14 ± 26.25	14.88 ± 2.74	16.51 ± 4.18	48.04 ± 6.49
* Values are means from 3 replications with the standard error.	51.38 ± 11.88				
10000	243.35 ± 94.42	39.59 ± 3.51	18.86 ± 6.37	10.25 ± 3.26	67.51 ± 5.44

2. Visual observations

Most rice plants were still green and grew well. Lead toxicity did not cause death to the treated rice plants. Although certain rice diseases caused some rice plants to die. Likewise, Panich-pat *et al.* (2004) showed that lead phytotoxicity did not cause any visible symptoms to treated *T. angustifolia* plants, caused the treatment difference while nitrogen limitation.

3. Phytoextraction coefficient

Table 3. Phytoextraction coefficients on parts of rice plants.

Pb concentration (mgL ⁻¹)	Phytoextraction coefficients			
	Roots	Stems and leaves	Husk	Brown rice
0	60.78	24.35	64.04	57.91
2500	12.90	1.81	2.72	3.70
5000	2.35	1.36	0.35	0.39
7500	4.69	0.62	0.39	0.17
10000	3.60	0.59	0.29	0.16

References

- Environmental Protection Agency. 2000. Introduction to phytoremediation . State of the Science Conference, Boston: Massachusetts.
- Panich-pat, T., Pokethitiyook, P., Kruatrachue, M., Upatham, E.S., Srinives, P. and Lanza, G.R. 2004. Removal of lead from contaminated soils by *Typha*

Acknowledgements

This work was supported by the Thailand Research Fund (MRG4880179).

โครงการ การศึกษาการสะสมของสารตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าว

ธนวรรณ พานิชพัฒน์^{1*} และ พิระศักดิ์ ศรีนิเวศน์²

¹คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

ประเทศไทย

E-mail:faastwp@ku.ac.th

²ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตรกำแพงแสนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140 ประเทศ

ไทย

E-mail:agrpss@yahoo.com

บทคัดย่อ

จากการศึกษาการสะสมของสารตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าว ได้แก่ ราก ลำต้นและใบ และเมล็ดข้าว ใช้เวลาศึกษาทั้งสิ้น 2 ปี โดยใช้เมล็ดข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่ปลูกกันมากในอำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม การทดลองแบบ preliminary test เมื่อข้าวแตกกอจึงเติมสารละลายตะกั่วอะซิเตทที่ความเข้มข้น 0, 2,500, 5,000, 7,500 และ 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่ความเข้มข้น 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นค่าที่ข้าวสามารถสะสมตะกั่วได้มากที่สุด ในเมล็ด จึงนำค่าดังกล่าวมาทำการทดลองแบบ batch study โดยแบ่งความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเป็น 2 ค่า ที่ความเข้มข้น 1,500 และ 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นเติมลงในดินที่ข้าวระยะแตกกอ พบว่า ตะกั่วจะสะสมได้มากที่สุดที่ความเข้มข้นของตะกั่วสูงสุดในราก (400.48 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ลำต้นและใบ (127.68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ในเมล็ดส่วนของรำ (5.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) แกลบ (0.19 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ส่วนข้าวขาวจะไม่พบการสะสมของตะกั่ว เมื่อนำเมล็ดข้าวจาก batch study มาปลูกโดยไม่เติมสารละลายตะกั่วลงในดิน เป็นการทดลองแบบ pot study พบว่า มีการถ่ายทอดการสะสมของตะกั่วจาก batch study ไปสู่ pot study ในส่วนของราก ลำต้นและใบ และรำ แต่ไม่พบการสะสมของตะกั่วในแกลบเฉพาะ pot study ส่วนข้าวขาวจะไม่พบการสะสมของตะกั่วในทั้ง batch และ pot study นำรำข้าวที่มีการสะสมของตะกั่วสูงที่สุดจาก batch study มาตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องผ่าน พบว่า ตะกั่วจะสะสมมากที่สุดที่ แวคิวโอล

เอนโดพลาสมิก เรติคูลัม และ ไซโตพลาสซึม จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของตะกั่วในข้าวขาวไม่เกินมาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อนใช้กำหนดให้มีตะกั่ว 1 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ดังนั้น การบริโภคข้าวขาวจะไม่เกิดการเป็นพิษจากสารตะกั่ว อย่างไรก็ตามควรระมัดระวังในการนำฟางปนเปื้อนได้ไม่เกินข้าวที่มีการปนเปื้อนของสารตะกั่วไปใช้เลี้ยงสัตว์ เพราะตะกั่วสามารถสะสมในต้นข้าวได้มากในส่วนของราก ลำต้นและใบ เมื่อพิจารณาศักยภาพของข้าวในการใช้บำบัดตะกั่วในดิน พบว่า ต้นข้าวสามารถดูดซับตะกั่วในดินได้น้อย ไม่เหมาะสมที่จะเลือกใช้เป็นพืชบำบัดสารตะกั่วในดิน

Partitioning of lead accumulation in rice plant

Thanawan Panich-pat^{1*} and Peerasak Srinives²

*¹Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom
73140, Thailand*

E-mail:faastwp@ku.ac.th

*²Department of Agronomy, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart
University, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand*

E-mail:agrpss@yahoo.com

Abstract

A greenhouse study was conducted to examine the lead accumulation in various rice plant parts such as root, stem and leaf and grain for two consecutive years. Rice cv. 'Prathum Thani 1' used in this study because it has been widely grown in Kamphaeng Saen district, Nakhon Pathom province. Lead subacetate was supplied as a solution in distilled water at the concentration of 0, 2,500, 5,000, 7,500 and 10,000 mg of Pb L⁻¹ until the rice plant reached tillering stage. The result from the preliminary test indicated that the concentration at 2,500 mg Pb L⁻¹ allowed highest lead accumulation and this chosen as the reference concentration for the batch study. The batch study comprised two concentrations of 1,500 and 3,000 mg Pb L⁻¹, and applied once in the soil at tillering stage. The result of the batch study revealed that lead accumulation was the highest in root (400.48 mg kg⁻¹), stem and leaf (127.68 mg kg⁻¹), bran (5.3 mg kg⁻¹) and husk (0.19 mg kg⁻¹), respectively. White rice has no detectable lead accumulation. The grains from the batch study were sown in the soil without lead solution in a pot study. The result showed that lead translocation from the batch study to the pot study was noticeable root, stem and leaf, and bran, but not in husk for pot study. White rice had not found in both the batch and pot studies. The bran with highest lead accumulation from the batch study was checked on the transmission electron microscope which revealed lead accumulation in vacuole, endoplasmic reticulum and cytoplasm. From this study, the concentration of lead in rice grain did not exceed the food hygiene concentration limit (1.0 mg of Pb kg⁻¹ DW per 1.0 kg food weight). Thus, it is unlikely that lead can be accumulated to the toxic level in rice grain. However, the result from pot study showed that the concentrations of lead accumulated in stem and leaves (2.95 mg kg⁻¹) as well as

root (23.85 mg kg^{-1}) was rather high for using as animal feed. Although rice plants can accumulate some amount of lead, it is not suitable for use in cleaning up lead in soil.

Key words: lead accumulation, *Oryza sativa*, rice, grain

* Corresponding author.

Tel.: 034-281-105 ext. 458 ; Fax: 034-281-057 ;

E-mail: faastwp@ku.ac.th