



การตรึงโลหะหนักในกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบ ตะกอนเร่งด้วยเปลือกไข่ไก่เพื่อการปลูกข้าว

Fixation of Heavy Metals in Activated Sludge from Municipal Wastewater

Treatment System by Chicken Egg Shell for Rice Cultivation

พิมพณาราสอง (Pimnara Saengkao)¹* คณิตา ตังคณานุรักษ์ (Kanita Tangkananuruk)**

ดร.นพวรรณ เสงี่ยมิม (Dr.Noppawan Semvimol)***

(Received: October 5, 2018; Revised: January 21, 2019; Accepted: January 26, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบตะกอนเร่งสำหรับการปลูกข้าวโดยปราศจากการปนเปื้อนของโลหะหนัก วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ทำการทดลอง 20 ชุดการทดลอง รวม 60 กระถาง ศึกษาปัจจัยที่มีผล 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของดิน:กากตะกอน (1:1, 1:2 และ 2:1) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของกากตะกอน:เปลือกไข่ไก่ (10:1) และ ปริมาณของปุ๋ยเคมีตั้งแต่ 75% - 12.5% และ ไม่ใช้ปุ๋ยเคมี ผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองของดิน:กากตะกอน และกากตะกอน:เปลือกไข่ไก่ที่อัตราส่วน 1:2 และ 10:1 ตามลำดับ และปริมาณของปุ๋ยเคมี 50% ให้ผลผลิตข้าวสูงที่สุด นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก(สังกะสี ทองแดง เหล็ก แมงกานีส ตะกั่ว และนิกเกิล) ในน้ำชะจากการรดน้ำ และการสะสมในเมล็ดข้าว พบว่ามีโลหะหนักปนเปื้อนในน้ำชะและในเมล็ดข้าวในปริมาณที่ต่ำมากและไม่เกินค่ามาตรฐาน ดังนั้นการใช้ประโยชน์ของเปลือกไข่ไก่ ทำให้มีศักยภาพในการตรึงโลหะหนักในกากตะกอนและไม่สามารถปนเปื้อนในน้ำชะและผลผลิต นอกจากนี้การใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งยังช่วยลดการใช้ปุ๋ยเคมีและค่าใช้จ่าย

ABSTRACT

This research aims to utilize sludge from activated sludge municipal wastewater treatment system for rice cultivation without contamination of heavy metals. The twenty experimental treatments with 60 pots were designed by Randomized Complete Block Design. Three influenced factors were investigated, including ratio by wt. of soil to sludge (1:1, 2:1 and 1:2), ratio by wt. of sludge to chicken egg shell (CES) (10:1) and the amount of chemical fertilizer (CF) from 75% to 12.5% and control treatment (without using CF). The results revealed that the treatment which using soil to sludge and sludge to CES ratio at 1:2 and 10:1 respectively and 50% amount of CF gave the highest rice productivity. Moreover, in this treatment the heavy metals (Zn, Cu, Fe, Mn, Pb and Ni) in leachate from watering and in grain accumulation were analyzed. The results revealed that a trace level of heavy metals in leachate and grain were achieved and not over the standard. Therefore, utilization of CES, gave the potential on fixation heavy metals in sludge and unavailable to the leachate and productivity. In addition, utilization of sludge from AS treatment system could be reduced the use of CF and cost.

คำสำคัญ: โลหะหนัก เปลือกไข่ไก่ กากตะกอน

Keyword: Heavy metals, Chicken egg shell, Sludge

¹Correspondent author: oylukbie@gmail.com

* นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

** รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*** อาจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทนำ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge, AS) เป็นระบบบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและให้กากตะกอน (Sludge) ซึ่งจัดเป็นของเสียในปริมาณมากที่ต้องได้รับการกำจัด โดยวิธีการกำจัดกากตะกอนที่สามารถกำจัดได้หลายวิธี ได้แก่ การนำไปทิ้งบนพื้นดิน (land dumping) การถมที่ (landfill) การทิ้งในแอ่งดิน (lagoon) การเกลี่ยผสมกับหน้าดินเพื่อเป็นสารปรับปรุงดิน (spreading on soil) และการเผาทิ้ง (incineration) ซึ่งการกำจัดกากตะกอนแต่ละวิธีมีทั้งผลดีและผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมต่างกัน จึงต้องจัดการกากตะกอนอย่างเหมาะสมโดยคำนึงถึงคุณสมบัติของกากตะกอน ซึ่งกากตะกอนมีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชในปัจจุบันจึงได้มีการนำกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรกันอย่างแพร่หลาย เพื่อเป็นการลดของเสียที่ต้องได้รับการกำจัด ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่าย และช่วยลดการเกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังช่วยลดการใช้ปุ๋ยเคมี จึงทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง ซึ่งการนำกากตะกอนไปใช้ประโยชน์ในการเกษตรมีข้อควรระวังเกี่ยวกับการปนเปื้อนของโลหะหนัก ดังนั้นการนำกากตะกอนที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักเกินค่ามาตรฐานมาใช้ประโยชน์ จะส่งผลให้โลหะหนักละลายและเคลื่อนย้ายจากตะกอนเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ทำให้เกิดผลกระทบต่อมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม [1]

งานวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นการนำกากตะกอนที่มีปริมาณมากมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้อย่างปลอดภัย โดยใช้เปลือกไข่ไก่ ซึ่งการผลิตไข่ไก่ของไทยในปี 2560 มีปริมาณการผลิตไข่ไก่ 14,037.23 ล้านฟอง และมีปริมาณการบริโภคไข่ไก่ 13,932.72 ล้านฟอง [2] ทำให้เกิดเปลือกไข่ไก่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมาก จากทั้งอุตสาหกรรมและบ้านเรือน ซึ่งเปลือกไข่ไก่มีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก และตรึงโลหะหนักให้อยู่ในดิน โดยเปลือกไข่ไก่เกือบทั้งหมดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต มีรูพรุนประมาณ 6,000-8,000 รู สามารถจับโลหะหนักได้ [3] จากการศึกษาของพิมพ์ชนก [4] พบว่า กากตะกอนกับเปลือกไข่ไก่ที่อัตราส่วน 10:1 สามารถลดการชะละลายโลหะได้ดีที่สุด โลหะหนักที่ลดได้มากที่สุด คือ สังกะสี 98.04 % เพื่อต่อยอดการใช้ประโยชน์กากตะกอนและเปลือกไข่ไก่ได้จริง ผู้วิจัยจึงออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของดิน:กากตะกอน:เปลือกไข่ไก่ที่เหมาะสมในการปลูกข้าวที่ในน้ำชะจากการค่น้ำและผลผลิตมีการปนเปื้อนโลหะหนักในปริมาณที่ต่ำสุดหรือไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำชะและในผลผลิต อีกทั้งศึกษาการใช้กากตะกอนทดแทนการใช้ปุ๋ยเคมี เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการปลูกข้าวได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งให้เกิดประโยชน์ในการปลูกข้าวอย่างปลอดภัยจากโลหะหนัก โดยใช้เปลือกไข่ไก่ตรึงโลหะหนักเพื่อลดการปนเปื้อนในผลผลิตและสิ่งแวดล้อม
2. เพื่อใช้กากตะกอนทดแทนปุ๋ยเคมีในการปลูกข้าว

วิธีการวิจัย

1. การเก็บตัวอย่างและการเตรียมกากตะกอน

เก็บตัวอย่างกากตะกอนจากบ่อบำบัดน้ำเสีย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน (บ่อดักตะกอน) ซึ่งจะเก็บที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร โดยแบ่งบริเวณที่จะเก็บตัวอย่างเป็น 5 จุด และนำตัวอย่างกากตะกอนแต่ละจุด



มาคลุกเคล้าให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ผึ่งในที่ร่มจนดินแห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร เก็บตัวอย่างที่ได้ในถุงพลาสติก

2. การเก็บตัวอย่างและการเตรียมดินนา

เก็บตัวอย่างดินนาในพื้นที่ ณ บริเวณนาข้าวของเกษตรกร ตำบลทิวพัฒนา อำเภอน้อย จังหวัดนันทบุรี ซึ่งจะเก็บที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร โดยแบ่งบริเวณที่จะเก็บตัวอย่างเป็น 15 จุด และนำตัวอย่างจากตะกอนแต่ละจุดมาคลุกเคล้าให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ผึ่งในที่ร่มจนดินแห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร เก็บตัวอย่างที่ได้ในถุงพลาสติก

3. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกากตะกอนและดินนา

3.1 นำตัวอย่างกากตะกอนและดินนาที่เตรียมไว้มาวิเคราะห์สภาพความเป็นกรดด่างของดิน (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter, OM) ด้วยวิธี Walkley and Black ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (Total Nitrogen, TN) ด้วยวิธี Kjeldahl method และปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (Available Phosphorous, P) ด้วยวิธี Bray II

3.2 ทำการวิเคราะห์โลหะหนักทั้ง 8 ชนิด ได้แก่ สังกะสี แคดเมียม ตะกั่ว เหล็ก ทองแดง นิกเกิล โครเมียม และแมงกานีส โดยชั่งตัวอย่างแต่ละชนิด 0.50 กรัม นำมาย่อยตามวิธีมาตรฐาน US. EPA 3051 ด้วยเครื่อง Microwave Digester รุ่น Mar 6 240/50 และวิเคราะห์ปริมาณ โลหะหนักทั้ง 8 ชนิด ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) รุ่น Agilent 240AA/280AA

4. วางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองโดยจัดกลุ่มทดลองแบบ สุ่ม (Randomized complete block design, RCBD) ประกอบด้วยปัจจัยที่ศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยที่ 1 คือ อัตราส่วนระหว่างดินนากับกากตะกอนในอัตราส่วนดินนา: กากตะกอน 1:1 1:2 และ 2:1 ปัจจัยที่ 2 คือ เปลือกไข่ไก่ โดยใช้กากตะกอนกับเปลือกไข่ไก่ที่อัตราส่วน 10:1 ซึ่งจะสามารถลดการชะละลายโลหะได้ดีที่สุด ซึ่งเป็นผลงานวิจัยของพิมพ์ชนก [4] และปัจจัยที่ 3 อัตราส่วนของปุ๋ยเคมี แบ่งการใส่ปุ๋ยเคมีเป็น 2 ครั้ง ครั้งที่ 1 ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร (16-20-0) 30 กิโลกรัมต่อไร่ และครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) 15 กิโลกรัมต่อไร่ [5] โดยลดการใส่ปุ๋ยเคมีจาก 100% เป็น 75%, 50%, 25%, 12.5% และไม่ใส่ปุ๋ยเคมี ชุดการทดลองทั้งหมดประกอบด้วย 20 ชุดการทดลอง แต่ละชุดการทดลองทำ 3 ซ้ำ ดังตารางที่ 1

5. การเตรียมเปลือกไข่ไก่

เปลือกไข่ไก่ ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทเครือเจริญโภคภัณฑ์ จำกัด (มหาชน) นำเปลือกไข่ไก่ไปล้างด้วยน้ำสะอาด มาบดเป็นผงละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงเพื่อคัดแยกสิ่งเจือปน ตากเปลือกไข่ไก่ให้แห้ง แล้วจึงเก็บไว้ในที่แห้ง

6. การเตรียมชุดการทดลอง

เตรียมชุดการทดลองจำนวน 60 ชุด โดยใช้กระถางทดลองขนาด 9 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 20.3 เซนติเมตร เตรียมส่วนผสมสำหรับการปลูกข้าว ชั่งกากตะกอน ดินนา และเปลือกไข่ไก่ ตามรายละเอียดดังตารางที่ 1 นำส่วนผสมทั้ง 3 ส่วน ผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงใส่กระถางทดลองที่เตรียมไว้

7. การเพาะปลูกข้าว

นำเมล็ดข้าวพันธุ์ กข 61 แช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หุ้มข้าวด้วยกระสอบชุบน้ำคลุ่มเมล็ดพันธุ์ และรดน้ำให้ชุ่มเป็นเวลา 2 วัน จนรากงอกออกมา ประมาณ 5 มิลลิเมตร แล้วจึงนำเมล็ดพันธุ์ที่งอกไปเพาะในกะละมังที่เตรียมไว้ ทำ

การเพาะกล้า จนกระทั่งกล้าอายุครบ 30 วัน จึงย้ายไปปักดำในกระถางทดลองที่เตรียมไว้ โดยดำกล้าในกระถางทดลอง 3 ก่อต่อกระถางทดลอง

8. การใส่ปุ๋ยและการดูแลรักษา

คำนวณปริมาณปุ๋ย เมื่อใช้กากตะกอนทดแทนปุ๋ยเคมี ตามอัตราส่วนต่างๆ ทำการใส่ปุ๋ยเคมีสูตร (16-20-0) ครั้งที่ 1 ประมาณ 20 - 30 วัน หลังข้าวงอกเข้าสู่ระยะแตกกอ เมื่อเข้าสู่ช่วงข้าวแตงตัว เริ่มมีการปฏิสนธิออกดอกจะใส่ปุ๋ยเคมีสูตร (46-0-0) ครั้งที่ 2 ตามรายละเอียดในตารางที่ 1 ซึ่งวิธีการใส่ปุ๋ยจะใช้แรงงานคนในการหว่าน ทำการดูแลต้นข้าวตลอดระยะการเจริญเติบโต 105 วัน โดยให้น้ำประปา และรักษาระดับน้ำในกระถางที่ปลูกข้าวให้ได้ระดับ 5 เซนติเมตร จากผิวดินอยู่เสมอ พร้อมทั้งหมั่นเก็บวัชพืชออกจากกระถางทดลองตลอดช่วงการเพาะปลูก โดยอาจมีการใช้สารเคมีตามความเหมาะสม

9. การตรวจวัดการเจริญเติบโตและผลผลิตของต้นข้าว

การวิเคราะห์การเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ระหว่างการปลูกข้าวและหลังการปลูกข้าว ซึ่งระหว่างการปลูกข้าวจะศึกษาการเจริญเติบโต โดยทำการวัดและบันทึกความสูงของต้นข้าวโดยวัดจากพื้นดินถึงปลายใบธง หลังการปลูกทุกสัปดาห์จนถึงอายุเก็บเกี่ยว และหลังการปลูกข้าวจะศึกษาผลผลิตโดยบันทึกจำนวนรวงต่อต้น น้ำหนักเมล็ด 1,000 เมล็ด และผลผลิตข้าว (กิโลกรัมต่อไร่) ซึ่งจะเก็บเกี่ยวเมื่อต้นข้าวเจริญเติบโตเต็มวัย

10. การวิเคราะห์โลหะหนักจากน้ำชะที่รดน้ำต้นข้าว

ทำการวิเคราะห์โลหะหนักทั้ง 8 ชนิด โดยเก็บน้ำชะในจานรองกระถางทดลอง 60 กระถาง ที่ได้จากการรดน้ำต้นข้าว 30 มิลลิลิตร หลังจากการเก็บเกี่ยวโดยนำมาย่อยตามวิธีมาตรฐาน US. EPA 3015a ด้วยเครื่อง Microwave Digester และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้ง 8 ชนิด ด้วยเครื่อง AAS

11. การศึกษาปริมาณโลหะหนักในเมล็ดข้าวเปลือก

หลังเก็บเกี่ยวนำมาเมล็ดข้าวเปลือกมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักทั้ง 8 ชนิด โดยการกะเทาะเปลือกข้าวออกและตำข้าวให้ละเอียดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร และชั่งข้าวเปลือกที่บดแล้ว 0.50 กรัม นำมาย่อยตามวิธีมาตรฐาน US. EPA 3051 ด้วยเครื่อง Microwave Digester และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้ง 8 ชนิด ด้วยเครื่อง AAS

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของกากตะกอนและดินนา

ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของกากตะกอน ดังตารางที่ 2 พบว่า กากตะกอนมีความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6.50 ค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 4.00 dS/m ปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 32.30 % โดยมวล ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ 1.87 % โดยมวล ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เท่ากับ 85.00 มก./กก. ซึ่งตามปทานุกรมปฐพีวิทยาจัดได้ว่ากากตะกอนมีความเป็นกรดเล็กน้อย ปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับสูงมาก ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในระดับสูงมาก และปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับสูงมาก [6] กากตะกอนจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการเพาะปลูกพืช เนื่องจากมีธาตุอาหารสูง และเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร [7] พบว่า กากตะกอนมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ จึงเหมาะสมที่จะใช้กากตะกอนทดแทนปุ๋ยเคมีได้



ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินนา พบว่า ดินนามีความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7.40 ค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 3.00 dS/m ปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 1.52 % โดยมวล ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ 0.11 % โดยมวล ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เท่ากับ 25.86 มก./กก. ซึ่งตามปทานุกรมปฐพีวิทยาจัดได้ว่าดินนามีความเป็นด่างอ่อน ปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับปานกลาง ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในระดับปานกลาง และปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับสูง [6]

2. ผลการศึกษาปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกากตะกอนและดินนา

ผลการศึกษาปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกากตะกอนและในดินนา ดังตารางที่ 3 พบว่า ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินนา ได้แก่ เหล็ก สังกะสี และแมงกานีส มีปริมาณต่ำและไม่เกินค่ามาตรฐาน และไม่พบการปนเปื้อนโครเมียม และแคดเมียมในกากตะกอน เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานโลหะหนักของกรมควบคุมมลพิษ [8] และกรมพัฒนาที่ดิน [6] พบว่า ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกากตะกอนที่ไม่เกินค่ามาตรฐาน ได้แก่ นิกเกิล ตะกั่ว แมงกานีส ชกวัน ทองแดง เหล็ก สังกะสี ที่มีปริมาณเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ค่อนข้างสูง ซึ่งโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดนี้มีโอกาสที่จะถูกชะละลายออกมาปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้

3. ผลการศึกษาการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว

เมื่อศึกษาการเจริญเติบโตทางความสูงของต้นข้าวโดยการวัดและบันทึกความสูง พบว่า การใช้กากตะกอนดินนา เปลือกไข่ไก่ และใส่ปุ๋ยเคมีที่อัตราส่วนแตกต่างกัน ไม่ส่งผลต่อความสูงของต้นข้าว พบว่าความสูงของต้นข้าวอยู่ในช่วง 80-85 ซม. นอกจากนี้ยังพบว่าชุดการทดลองที่ 14 ที่มีการใช้ดินนา 2 กก. กากตะกอน 4 กก. ร่วมกับเปลือกไข่ไก่ 0.4 กก. และใส่ปุ๋ยเคมี 50 % ให้ผลผลิตสูงสุดและคุณภาพของข้าวดีที่สุด ในทั้งหมด 20 ชุดการทดลอง โดยข้าวมีการออกรวง 22.00 รวงต่อกระถาง น้ำหนักของเมล็ด 38.60 กรัมต่อ 1,000 เมล็ด และผลผลิตต่อไร่ 1,237.33 กก./ไร่ ดังตารางที่ 4 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Singh and Agrawal [9] ศึกษาอัตราการเจริญเติบโตมวลชีวภาพ และผลผลิตของข้าวที่ปลูกในดินผสมกับกากตะกอนในอัตราส่วนแตกต่างกัน พบว่า การนำกากตะกอนมาผสมกับดินนา ส่งผลให้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการปลูกข้าวที่ไม่ได้ผสมกากตะกอน

ผลการลดต้นทุนของเกษตรกร พบว่า การทำนา 1 รอบ เกษตรกรต้องใส่ปุ๋ยเคมี ทั้งหมด 45 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งคิดเป็นมูลค่าการใช้ปุ๋ยเคมีสูตร 16-20-0 ใส่ 30 กิโลกรัม/ไร่ ประมาณ 390 บาท/ไร่ (ปุ๋ยเคมีอัตรา 1 กิโลกรัมละ 13 บาท) และปุ๋ยยูเรีย 46-0-0 ใส่ 15 กิโลกรัม/ไร่ ประมาณ 165 บาท/ไร่ (ปุ๋ยเคมีอัตรา 1 กิโลกรัมละ 11 บาท) ข้อมูล ณ เดือนธันวาคม พ.ศ.2560 ดังนั้นค่าการใช้ปุ๋ยเคมีทั้งหมด เท่ากับ 555 บาท/ไร่ การใช้กากตะกอนทดแทนปุ๋ยเคมี ทำให้เกษตรกรลดค่าใช้จ่ายได้ จากชุดการทดลองที่ให้ผลผลิตดีที่สุด คือ การใช้ดินนา 2 กก. กากตะกอน 4 กก. ร่วมกับเปลือกไข่ไก่ 0.4 กก. และใส่ปุ๋ยเคมี 50 % นั้นมีความเหมาะสมต่อการปลูกข้าว เนื่องจากให้ผลผลิตข้าวสูงที่สุด และเป็นการลดอัตราการใส่ปุ๋ยเคมีของเกษตรกรลงไป 22.50 กิโลกรัม/ไร่ โดยสามารถลดค่าใช้จ่ายประมาณ 277.50 บาท/ไร่ แสดงให้เห็นว่า การลงทุนทำนาของเกษตรกรจะเป็นการลงทุนที่ซื้อปุ๋ยเคมีในอัตราที่ลดลง 50% จึงเป็นการประหยัดต้นทุนจากเดิมที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายปุ๋ยเคมีถึง 555 บาทต่อไร่

4. ผลการศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำชะที่รดน้ำต้นข้าว

จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะที่รดน้ำต้นข้าว ดังตารางที่ 5 โดยชุดการทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาระยะเวลาของกากตะกอนที่มีปริมาณโลหะหนักโดยไม่มีการใส่เปลือกไข่ไก่ พบว่า มีปริมาณโลหะหนัก สังกะสี ทองแดง เหล็ก แมงกานีส ตะกั่ว และนิกเกิล ปริมาณ 5.781, 0.009, 0.455, 5.135, 0.660 และ 0.090 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณโลหะหนักที่หลุดออกมานั้นเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งชลประทาน [10] ชกวัน ทองแดง และนิกเกิล ส่วนชุดการทดลองที่ 3 ใช้กากตะกอนร่วมกับดินนา พบว่า ดินนามีส่วนช่วยลดการชะละลายของปริมาณโลหะหนัก

เนื่องจากดินนาจัดเป็นประเภทดินเหนียวซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากและมีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนจึงช่วยในการดูดซับโลหะหนักที่เป็นแคตไอออนไว้ได้ แต่ช่วยลดเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ 2 ซึ่งใช้กากตะกอนร่วมกับเปลือกไข่ไก่ ดังนั้นชุดการทดลองที่ใช้กากตะกอนร่วมกับดินนา และเปลือกไข่ไก่ พบว่า โลหะหนักสังกะสี และแมงกานีส ไม่มีการหลุดออกมาจากน้ำชะ แต่ทองแดง เหล็ก ตะกั่ว และนิกเกิล มีการหลุดออกมาจากน้ำชะ แต่ค่าที่วัดได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งชลประทาน แสดงให้เห็นว่าเปลือกไข่ไก่สามารถตรึงโลหะหนักไว้ในดินและช่วยลดการชะละลายโลหะหนักไม่ให้ออกสู่สิ่งแวดล้อมหรือแหล่งน้ำสาธารณะได้ เนื่องจากเปลือกไข่ไก่มิมีรูพรุนมากจึงดูดซับโลหะหนักให้อยู่ในช่องว่างเหล่านั้น และมีองค์ประกอบเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่จับกับโลหะหนักเกิดเป็นตะกอนคาร์บอเนต ซึ่งเป็นตะกอนที่ไม่ละลายน้ำ จึงสามารถตรึงโลหะหนักให้อยู่ในดินได้ดี [3]

5. ผลการศึกษาปริมาณโลหะหนักในเมล็ดข้าว

จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในเมล็ดข้าว ดังตารางที่ 6 โดยชุดการทดลองที่ 1 ใช้กากตะกอนปลูกข้าวเพียงอย่างเดียวไม่ได้ใส่เปลือกไข่ไก่ พบว่า ในเมล็ดข้าวมีสังกะสี ทองแดง เหล็ก แมงกานีส ตะกั่ว และนิกเกิล สะสมในปริมาณ 43.37, 18.70, 68.20, 19.9, 18.50 และ 8.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่สะสมในเมล็ดข้าวนั้นเกินเกณฑ์มาตรฐานโลหะหนักในอาหารของกระทรวงสาธารณสุข [11] ยกเว้นสังกะสี เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ 2 ใช้กากตะกอนร่วมกับเปลือกไข่ไก่ พบว่า ปริมาณโลหะหนักในเมล็ดข้าวลดลงอย่างมาก ส่วนชุดการทดลองที่ 3 ใช้กากตะกอนร่วมกับดินนา พบว่า ดินนามีส่วนช่วยลดปริมาณโลหะหนักในเมล็ดข้าวแต่ช่วยลดได้น้อยกว่าการใช้เปลือกไข่ไก่ ดังนั้นชุดการทดลองที่ใช้กากตะกอนร่วมกับดินนา และเปลือกไข่ไก่ พบว่า ปริมาณโลหะหนักที่สะสมในเมล็ดข้าวต่ำกว่าค่ามาตรฐานแต่ตะกั่วมีปริมาณใกล้เคียงที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ อยู่ในช่วง 0.42-0.74 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมาตรฐานโลหะหนักในอาหารของกระทรวงสาธารณสุขกำหนดไว้ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แสดงให้เห็นว่าหากไม่มีวัสดุดูดซับโลหะหนักจะมีการเคลื่อนย้ายเข้าไปสะสมอยู่ในเมล็ดข้าว ดังนั้นการใช้เปลือกไข่ไก่เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักนั้นสามารถตรึงโลหะหนักในดินไม่ให้มีการเคลื่อนย้ายสะสมที่เมล็ดข้าวได้โดยโลหะหนักสังกะสี ทองแดง เหล็ก แมงกานีส และนิกเกิล เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืช จึงมีอยู่ในเมล็ดข้าว ซึ่งเป็นปริมาณที่อยู่ในระดับที่เป็นธาตุอาหาร

สรุปผลการวิจัย

การใช้กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบตะกอนเร่งทดแทนปุ๋ยเคมีในการปลูกข้าว โดยการลดอัตราการใช้ปุ๋ยเคมี ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว พบว่า การใช้อัตราส่วนดินนา:กากตะกอน 1:2 และใส่ปุ๋ยเคมี 50 % ให้ผลผลิตข้าวสูงที่สุดและคุณภาพของข้าวดีที่สุด นอกจากนี้ยังช่วยเกษตรกรลดค่าใช้จ่าย โดยเป็นการลดอัตราการใช้ปุ๋ยเคมีของเกษตรกร 50 % โดยสามารถลดค่าใช้จ่ายประมาณ 277.50 บาท/ไร่ การนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบตะกอนเร่งและเปลือกไข่ไก่โดยใช้อัตราส่วนกากตะกอน:เปลือกไข่ไก่ 10:1 สามารถลดการชะละลายโลหะหนักได้ดีที่สุด มาใช้ประโยชน์ในการปลูกข้าว โดยเปลือกไข่ไก่ทำหน้าที่ใช้เป็นวัสดุตรึงโลหะหนักในดินส่งผลต่อเมล็ดข้าวมีการปนเปื้อนโลหะหนักไม่เกินค่ามาตรฐานโลหะหนักในอาหารของกระทรวงสาธารณสุข แต่ตะกั่วมีปริมาณใกล้เคียงที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ และการตรวจวัดปริมาณโลหะหนักจากน้ำชะที่รดน้ำต้นข้าว พบว่า โลหะหนักสังกะสี และแมงกานีส ไม่มีการหลุดออกมาจากน้ำชะ แต่ทองแดง เหล็ก ตะกั่ว และนิกเกิล มีการหลุดออกมาจากน้ำชะแต่ค่าที่วัดได้ไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งชลประทาน ดังนั้นการลดลงของปริมาณโลหะหนักมาจากการดูดซับ



โลหะหนักไว้ในเปลือกไข่ไก่ ซึ่งช่วยลดการชะละลายโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมและการเคลื่อนย้ายสะสมที่เมล็ดข้าวในปริมาณต่ำ

การนำกากตะกอนมาใช้ประโยชน์ในการปลูกข้าวจะต้องมีการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักก่อนนำมาใช้ประโยชน์ทุกครั้ง หากมีปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนมากเกินไป ไม่ควรนำกากตะกอนมาใช้ เนื่องจากปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนจะเคลื่อนย้ายเข้าไปสะสมอยู่ในเมล็ดข้าวปริมาณมาก หากบริโภคจะทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ได้

กิตติกรรมประกาศ

ได้รับการสนับสนุนการวิจัยภายใต้แผนงานเสริมสร้างศักยภาพและพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ ตามทิศทางยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรม ประเภทบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2562

เอกสารอ้างอิง

1. Mitmanochai N. The extraction of heavy metals from sludge in the lagoon treatment system from Phetchaburi municipal by chemical and natural processes [PhD thesis]. Bangkok: Kasetsart University; 2003. Thai.
2. Office of Agricultural Economics. Important agricultural products and trends in 2018. Bangkok: Office of Agricultural Economics; 2017. 230 p. Thai.
3. Kaewsomboon W. Removal of lead from battery manufacturing wastewater by egg shell [PhD thesis]. Nakhon Pathom: Mahidol University; 2006. Thai.
4. Boonchoo P. Reduction of heavy metals leaching from sludge of activated sludge domestic wastewater treatment [PhD thesis]. Bangkok: Kasetsart University; 2016. Thai.
5. Department of Agriculture. Rice. Bangkok: Ministry of Agriculture and Cooperatives; 2004. 151 p. Thai.
6. Land Development Department. Soil improvement with organic matter. Bangkok: Soil and Water Conservation Division Land Development Department; 1997. 165 p. Thai.
7. Department of Agriculture. Organic fertilizer manual (academic issue). Bangkok: Ministry of Agriculture and Cooperatives; 2008. 116 p. Thai.
8. Pollution Control Department. Soil Quality Standards for the Living and Agriculture [Internet]. 2004 [cited 2017 Dec 20]. Available from: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_soil01.html#s1. Thai.
9. Singh RP, Agrawal M. Variations in heavy metal accumulation growth and yield of rice plants grown at different sewage sludge amendment rates. Journal of Ecotoxicology and Environmental Safety; 2010; 73: 632 - 641.
10. Royal Irrigation Department. Waste water Quality Standards [Internet]. 2011 [cited 2017 Dec 20]. Available from: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html#s5. Thai.
11. Ministry of Public Health. Heavy Metals Standards in food [Internet]. 1986 [cited 2017 Dec 20]. Available from: http://food.fda.moph.go.th/law/announ_moph1-150.php. Thai.

ตารางที่ 1 ชุดการทดลอง และอัตราการใช้ปุ๋ยเคมีสูตร (16-20-0) ครั้งที่ 1 และปุ๋ยเคมีสูตร (46-0-0) ครั้งที่ 2 ของแต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	ปุ๋ยเคมี (16-20-0) (กก./ไร่)	ปุ๋ยเคมี (46-0-0) (กก./ไร่)
1. กากตะกอน 6 กก. (control 1)	-	-
2. กากตะกอน 6 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.6 กก. (control 2)	-	-
3. กากตะกอน 3 กก. + ดินนา 3 กก. (control 3)	-	-
4. ดินนา 6 กก. (control 4)	-	-
5. ดินนา 6 กก.+ ปุ๋ยเคมี 100 % (control 5)	30.00	15.00
6. ดินนา 3 กก. + กากตะกอน 3 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.3 กก.	-	-
7. ดินนา 3 กก. + กากตะกอน 3 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.3 กก.+ ปุ๋ยเคมี 12.5 %	3.75	1.88
8. ดินนา 3 กก. + กากตะกอน 3 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.3 กก.+ ปุ๋ยเคมี 25 %	7.50	3.75
9. ดินนา 3 กก. + กากตะกอน 3 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.3 กก.+ ปุ๋ยเคมี 50 %	15.00	7.50
10. ดินนา 3 กก. + กากตะกอน 3 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.3 กก.+ ปุ๋ยเคมี 75 %	22.50	11.25
11. ดินนา 2 กก. + กากตะกอน 4 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.4 กก.	-	-
12. ดินนา 2 กก. + กากตะกอน 4 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.4 กก.+ ปุ๋ยเคมี 12.5 %	3.75	1.88
13. ดินนา 2 กก. + กากตะกอน 4 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.4 กก.+ ปุ๋ยเคมี 25 %	7.50	3.75
14. ดินนา 2 กก. + กากตะกอน 4 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.4 กก.+ ปุ๋ยเคมี 50 %	15.00	7.50
15. ดินนา 2 กก. + กากตะกอน 4 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.4 กก.+ ปุ๋ยเคมี 75 %	22.50	11.25
16. ดินนา 4 กก. + กากตะกอน 2 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.2 กก.	-	-
17. ดินนา 4 กก. + กากตะกอน 2 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.2 กก.+ ปุ๋ยเคมี 12.5 %	3.75	1.88
18. ดินนา 4 กก. + กากตะกอน 2 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.2 กก.+ ปุ๋ยเคมี 25 %	7.50	3.75
19. ดินนา 4 กก. + กากตะกอน 2 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.2 กก.+ ปุ๋ยเคมี 50 %	15.00	7.50
20. ดินนา 4 กก. + กากตะกอน 2 กก. + เปลือกไข่ไก่ 0.2 กก.+ ปุ๋ยเคมี 75 %	22.50	11.25



ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีของกากตะกอนและดินนา

พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา	ผลการวิเคราะห์		มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ [7]
	กากตะกอน	ดินนา	
1. ความเป็นกรด-เบส	6.50	7.40	5.50-8.50
2. ค่าการนำไฟฟ้า (dS/m)	4.00	3.00	≤ 10.00
3. ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%w/w)	32.30	1.52	≥ 20.00
4. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (%w/w)	1.87	0.11	≥ 1.00
5. ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (mg/kg)	85.00	25.86	≥ 0.50

ตารางที่ 3 ปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกากตะกอนและดินนา

โลหะหนัก	ผลการวิเคราะห์		ค่ามาตรฐาน
	กากตะกอน (มก./กก.)	ดินนา (มก./กก.)	
โครเมียม (Cr)	ND	ND	*300.00
นิกเกิล (Ni)	33.40	ND	*1,600.00
ทองแดง (Cu)	197.60	ND	**45.00
เหล็ก (Fe)	1509.74	154.20	**200.00
ตะกั่ว (Pb)	56.00	ND	*400.00
แคดเมียม (Cd)	ND	ND	*37.00
สังกะสี (Zn)	266.00	15.14	**100.00
แมงกานีส (Mn)	593.00	22.60	*1,800.00

หมายเหตุ : ND คือ Non-detected ไม่พบ

* หมายถึง ค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่ออยู่อาศัยและเกษตรกรรมของกรมควบคุมมลพิษ [8]

** หมายถึง ค่ามาตรฐานคุณภาพดินของกรมพัฒนาที่ดิน [6]

ตารางที่ 4 การเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวที่อัตราส่วนของกากตะกอน ดินนา เปลือกไข่ไก่และปุ๋ยเคมีแตกต่างกัน

ชุดการทดลอง	ความสูง (ซม.)	จำนวนรวง (รวง/กระถาง)	น้ำหนักเมล็ด (กรัม/1,000 เมล็ด)	ผลผลิตข้าว (กก./ไร่)
1	85.00 ± 0.58	21.00 ± 0.58	28.52 ± 0.42	1,006.93 ± 8.54
2	83.00 ± 0.58	20.00 ± 0.58	30.68 ± 0.42	1,024.00 ± 8.54
3	82.00 ± 1.00	18.00 ± 0.58	28.75 ± 0.43	1,015.47 ± 8.54
4	80.00 ± 1.00	14.00 ± 1.00	22.80 ± 0.41	725.33 ± 8.54
5	83.00 ± 0.58	16.00 ± 0.58	27.66 ± 0.46	938.66 ± 8.54
6	83.00 ± 1.53	17.00 ± 0.58	31.11 ± 0.42	1,058.13 ± 8.54
7	83.00 ± 1.00	18.00 ± 0.58	30.99 ± 0.45	1,066.67 ± 8.54
8	83.00 ± 0.58	18.00 ± 1.00	31.23 ± 0.40	1,083.73 ± 8.54
9	85.00 ± 1.00	19.00 ± 1.53	32.00 ± 0.42	1,117.87 ± 8.54
10	84.00 ± 0.58	18.00 ± 0.58	31.82 ± 0.43	1,092.27 ± 8.54
11	83.00 ± 0.58	19.00 ± 0.58	33.55 ± 0.45	1,152.00 ± 8.54
12	85.00 ± 1.00	19.00 ± 1.00	35.14 ± 0.43	1,169.07 ± 8.54
13	85.00 ± 1.00	20.00 ± 1.00	37.45 ± 0.42	1,186.13 ± 8.54
14	84.00 ± 0.58	22.00 ± 0.58	38.60 ± 0.44	1,237.33 ± 8.54
15	83.00 ± 0.58	20.00 ± 0.58	37.48 ± 0.45	1,203.20 ± 8.54
16	84.00 ± 1.53	17.00 ± 1.00	29.97 ± 0.47	1,041.07 ± 8.54
17	82.00 ± 1.00	17.00 ± 1.53	29.70 ± 0.46	1,049.60 ± 8.54
18	84.00 ± 1.53	17.00 ± 0.58	29.33 ± 0.42	1,032.53 ± 8.54
19	83.00 ± 0.58	18.00 ± 1.00	30.69 ± 0.42	1,075.20 ± 8.54
20	81.00 ± 1.00	17.00 ± 0.58	29.27 ± 0.44	1,024.00 ± 8.54



ตารางที่ 5 ผลการศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำชะที่รดน้ำต้นข้าว

ชุดการ ทดลอง	Zn mg/L	Cu mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	Pb mg/L	Ni mg/L
1	5.781 ± 0.009	0.009 ± 0.091	0.455 ± 0.040	5.135 ± 0.472	0.660 ± 0.050	0.090 ± 0.005
2	ND	0.005 ± 0.001	0.075 ± 0.004	ND	0.060 ± 0.005	0.045 ± 0.007
3	4.231 ± 0.038	0.008 ± 0.001	0.217 ± 0.037	3.357 ± 0.324	0.420 ± 0.060	0.070 ± 0.015
4	0.054 ± 0.006	ND	0.077 ± 0.004	0.096 ± 0.004	ND	ND
5	0.088 ± 0.008	ND	0.068 ± 0.003	0.072 ± 0.003	ND	ND
6	ND	0.006 ± 0.001	0.083 ± 0.004	ND	0.050 ± 0.005	0.057 ± 0.012
7	ND	0.005 ± 0.001	0.071 ± 0.005	ND	0.040 ± 0.005	0.042 ± 0.007
8	ND	0.005 ± 0.001	0.080 ± 0.004	ND	0.050 ± 0.005	0.050 ± 0.013
9	ND	0.004 ± 0.001	0.072 ± 0.006	ND	0.060 ± 0.010	0.055 ± 0.012
10	ND	0.004 ± 0.001	0.074 ± 0.006	ND	0.040 ± 0.015	0.034 ± 0.014
11	ND	0.007 ± 0.001	0.083 ± 0.005	ND	0.070 ± 0.005	0.058 ± 0.012
12	ND	0.005 ± 0.001	0.091 ± 0.005	ND	0.060 ± 0.015	0.063 ± 0.008
13	ND	0.006 ± 0.001	0.070 ± 0.005	ND	0.080 ± 0.005	0.061 ± 0.007
14	ND	0.005 ± 0.001	0.094 ± 0.003	ND	0.050 ± 0.010	0.049 ± 0.013
15	ND	0.006 ± 0.001	0.107 ± 0.004	ND	0.040 ± 0.010	0.064 ± 0.007
16	ND	0.003 ± 0.001	0.105 ± 0.006	ND	0.060 ± 0.015	0.047 ± 0.012
17	ND	0.004 ± 0.001	0.080 ± 0.005	ND	0.050 ± 0.005	0.054 ± 0.014
18	ND	0.005 ± 0.001	0.098 ± 0.005	ND	0.070 ± 0.015	0.048 ± 0.008
19	ND	0.003 ± 0.001	0.081 ± 0.004	ND	0.050 ± 0.010	0.052 ± 0.012
20	ND	0.005 ± 0.001	0.079 ± 0.006	ND	0.040 ± 0.005	0.048 ± 0.007
มาตรฐาน น้ำทิ้ง	5.00	1.00	n.a.	5.00	0.10	0.20
ชลประทาน						
[10]						

หมายเหตุ: ND คือ Non-detected ไม่พบ

n.a. คือ ไม่มีรายงานข้อมูล

ตารางที่ 6 ผลการศึกษาปริมาณโลหะหนักในเมล็ดข้าว

ชุดการ ทดลอง	Zn mg/kg	Cu mg/kg	Fe mg/kg	Mn mg/kg	Pb mg/kg	Ni mg/kg
1	43.37 ± 0.89	23.70 ± 0.58	68.20 ± 0.57	19.9 ± 0.72	18.50 ± 0.45	8.10 ± 0.57
2	7.86 ± 0.53	4.69 ± 0.07	8.61 ± 0.53	3.81 ± 0.02	2.03 ± 0.08	3.18 ± 0.13
3	22.84 ± 0.52	10.65 ± 0.72	37.86 ± 0.39	9.13 ± 0.43	7.91 ± 0.71	5.46 ± 0.34
4	3.21 ± 0.54	ND	7.10 ± 0.55	2.30 ± 0.72	ND	ND
5	3.34 ± 0.91	ND	6.88 ± 0.56	3.25 ± 0.79	ND	ND
6	4.67 ± 0.82	1.50 ± 0.07	5.02 ± 0.55	1.35 ± 0.55	0.63 ± 0.11	1.37 ± 0.16
7	3.68 ± 0.52	1.47 ± 0.10	5.24 ± 0.63	1.23 ± 0.45	0.50 ± 0.12	1.24 ± 0.11
8	3.39 ± 0.58	1.52 ± 0.07	5.31 ± 0.62	1.38 ± 0.72	0.58 ± 0.08	1.27 ± 0.11
9	4.02 ± 0.71	1.63 ± 0.13	4.99 ± 0.58	1.46 ± 0.70	0.51 ± 0.11	1.31 ± 0.09
10	4.91 ± 0.63	1.55 ± 0.08	5.55 ± 0.84	1.49 ± 0.52	0.59 ± 0.07	1.38 ± 0.12
11	5.09 ± 0.57	1.82 ± 0.10	7.12 ± 0.53	1.75 ± 0.61	0.62 ± 0.09	1.57 ± 0.13
12	5.76 ± 0.88	1.80 ± 0.09	6.87 ± 0.80	1.69 ± 0.45	0.64 ± 0.12	1.47 ± 0.08
13	5.25 ± 0.84	1.78 ± 0.08	7.09 ± 0.52	1.74 ± 0.72	0.63 ± 0.10	1.55 ± 0.10
14	5.48 ± 0.56	1.81 ± 0.07	7.25 ± 0.71	1.63 ± 0.64	0.62 ± 0.08	1.53 ± 0.08
15	5.60 ± 0.53	1.77 ± 0.08	6.98 ± 0.59	1.70 ± 0.72	0.74 ± 0.09	1.62 ± 0.12
16	2.98 ± 0.66	0.95 ± 0.10	4.97 ± 0.56	1.23 ± 0.54	0.42 ± 0.11	0.92 ± 0.14
17	3.33 ± 0.58	0.97 ± 0.11	4.71 ± 0.68	1.31 ± 0.52	0.46 ± 0.08	0.97 ± 0.12
18	3.50 ± 0.78	0.88 ± 0.09	4.62 ± 0.74	1.42 ± 0.48	0.49 ± 0.10	0.99 ± 0.16
19	2.90 ± 0.53	0.96 ± 0.13	4.66 ± 0.53	1.34 ± 0.56	0.46 ± 0.08	0.89 ± 0.09
20	3.51 ± 0.89	0.84 ± 0.09	4.68 ± 0.55	1.25 ± 0.64	0.45 ± 0.11	0.94 ± 0.13
มาตรฐาน	100.00	20.00	n.a.	n.a.	1.00	n.a.
โลหะหนัก						
ในอาหาร						
ของ						
กระทรวง						
สาธารณสุข						
[11]						

หมายเหตุ: ND คือ Non-detected ไม่พบ

n.a. คือ ไม่มีรายงานข้อมูล