

บทความวิจัย (Research Article)

การลดการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินสำหรับการปลูกข้าวนาดำ

วิมลรัตน์ ศีตีสาร¹ และ สุขทัย พงศ์พัฒน์ศิริ^{1*}

Reduction of cadmium contamination in soil for transplanting paddy fields

Wimonrat Sitisara^{1*} and Sukthai Pongpattanasiri^{1*}¹ School of Energy and Environment, University of Phayao, Phayao, 56000

* Corresponding author: sukthai.po@up.ac.th

Naresuan Phayao J. 2022;15(1):122-136

Received; 29 September 2021; Revised: 2 February 2022; Accepted: 29 March 2022

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดิน และลดการปนเปื้อนของแคดเมียมในดิน ด้วย สารชีวภัณฑ์ที่ประกอบด้วยเชื้อผสมของ *Achormobacter sp.*, *Azoto bacter sp.*, *Bacillus sp.* และ *Nitrobacter sp.* และไคโตซานโดยออกแบบการทดลอง ดังนี้ 1) การทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 16-20-0 (CH) 2) การทดลองที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ (OR) 3) การทดลองที่ใส่สารชีวภัณฑ์ในอัตราส่วนมีความเข้มข้น 100-500 มิลลิลิตรต่อไร่ (MIC) และ 4) การทดลองที่ใส่สารไคโตซาน 100-500 มิลลิลิตรต่อไร่ (CHI) โดยในแต่ละการทดลองประกอบด้วย 5 กระถาง ซึ่งในแต่ละกระถางบรรจุ ดินปนเปื้อนสังเคราะห์ มีค่าแคดเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 104.20 mg/kg ซึ่งพบว่าแคดเมียมในดินลดลงตามระยะการเจริญ โดยระยะการเจริญ (VP) > ระยะตั้งท้อง (RP) > ระยะเก็บเกี่ยว (HP) และการทดลองที่มีการใช้สารชีวภัณฑ์มีปริมาณ แคดเมียมลดลง 20.00-70.00 mg/kg ในขณะที่การทดลองที่ใช้สารละลายไคโตซานมีปริมาณแคดเมียมลดลง 10.00-20.00 mg/kg โดยลดลงมากกว่า CH 2.50-8.00 เท่า และ 1.30-2.00 เท่า ตามลำดับ ทั้งนี้ MIC500 เป็นหน่วยการทดลองเดี่ยว ที่ในหนึ่งรอบการใช้ดินที่มีปริมาณแคดเมียม ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัย และเกษตรกรรมที่มีค่าน้อยกว่า 37.00 mg/kg (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2560) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ลดลง ทั้งนี้ในระยะ VP การทดลอง MIC และ CHI มีปริมาณไนโตรเจนในดินเพิ่มขึ้น 3.79-4.22 g/kg และ 3.79-3.96 g/kg ตามลำดับ ปริมาณฟอสฟอรัสในดินของ การทดลอง OR, MIC และ CHI มีค่าเพิ่มขึ้น 0.82-1.03 เท่า เมื่อเทียบกับ CH นอกจากนี้ ในการทดลอง CH พบว่ามีปริมาณโพแทสเซียมมากที่สุด เท่ากับ 49.04 mg/kg

คำสำคัญ : แคดเมียม, สารชีวภัณฑ์, จุลินทรีย์ในดิน, ปลูกข้าวขังน้ำ, ดินปนเปื้อนสังเคราะห์

¹ คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา 56000

Abstract

This research was aimed to improve soil chemical properties and reduce cadmium contamination in the soil with biological substances that consist of mixed bacteria of *Achormobacter* sp., *Azoto bacter* sp., *Bacillus* sp. and *Nitrobacter* sp. and Chitosan. The experiments were designed into 4 categories as follows; 1) The experiment with chemical fertilizer application with the formula 16-20-0 (CH) 2) The experiment with organic fertilizer (OR) 3) The experiment with the biological substances in the concentration ratio of 100-500 ml/rai (MIC) and 4) The experiment with Chitosan 100-500 ml/rai (CHI). The initial cadmium contaminated soil was 104.20 mg/kg as synthetic contaminated soils that used in whole experiments in 5 replications. It was found that the soil cadmium decreased according to the stage of growth, with Vegetative Phase (VP) > Reproductive Phase (RP) > Harvest Phase (HP). As for the experiment using biological substances, cadmium contents were decreased in 20.00-70.00 mg/kg. While in the experiment using the chitosan, the cadmium contents were reduced in 10.00-20.00 mg/kg. They were of the cadmium content that decreased more than CH of 2.50-8.00 and 1.30-2.00 times, respectively. In addition, MIC500 is the one of all experimental units that in a single cycle of soil containing cadmium content accepted the standard of soil quality used for residential and agricultural use with less than 37.00 mg/kg. (Pollution Control Department of Natural Resources and Environment, 2017) corresponded to the decrease in the amount of organic matter. In during VP, the MIC and CHI experiments, the results showed that nitrogen contents in soil were increased of 3.79-4.22 g/kg and 3.79-3.96 g/kg, respectively. As for the soil phosphorus content, in the OR, MIC and CHI experiments were increased by 0.82-1.03 times compared to the CH experiment. In addition, the highest potassium content was 49.04 mg/kg in the CH experiment.

Keywords: Cadmium, Biological substances, Soil microorganisms, Rice field flood irrigation, Synthetic contaminated soils

บทนำ

นอกจากการปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมจะมีสาเหตุมาจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า ปิโตรเลียม แล้ว [1] ยังมีสาเหตุที่เกิดจากการใช้สารเคมีในพื้นที่การเกษตร ได้แก่ การใช้ปุ๋ยเคมี ยาฆ่าแมลง ต่างๆ ซึ่งการย่อยสลายทางธรรมชาติของแคดเมียมมีครึ่งชีวิตที่ยาวนาน 15-30 ปี เป็นสาเหตุให้อยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน และส่งผลกระทบต่อพืช สัตว์ มนุษย์ จากรายงานการวิจัยพบว่า เมื่อแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจะจับกับเม็ดเลือด และ albumin ถ้ามีความเข้มข้นสูงถึง 200 µg จะส่งผลให้เซลล์ท่อไตไม่สามารถดูดซึมกลับโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น β_2 microglobulin ได้ นอกจากแคดเมียม

จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโรคไตได้แล้ว ยังถูกจัดให้เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์อีกด้วย [2]

ดังผลการศึกษาในประเทศไทยพบมีการสะสมของแคดเมียมบริเวณลุ่มน้ำแม่ตาบ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก แบ่งเป็นปริมาณการสะสมของแคดเมียมในดินมีค่าระหว่าง 0.5-284 mg/kg และปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าวมีค่าระหว่าง 0.04-1.75 mg/kg [3] ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานของ Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 0.2 mg/kg และในพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรี ราชบุรี เพชรบุรี กำแพงเพชร พิษณุโลก และนครสวรรค์ พบการสะสมแคดเมียมในผลผลิตข้าวสูงกว่าค่ามาตรฐาน Codex (0.2 mg/kg) [4] จากข้อมูลการส่งออกข้าวไทยในรายงานสรุปสถานการณ์ส่งออกข้าวไทย

การส่งออกข้าวในช่วงเดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ 2562 มีปริมาณรวม 1,639,260 ตัน มูลค่า 26,980.3 ล้านบาท (842.7 ล้านเหรียญสหรัฐ) และเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่ไทยส่งออกมากที่สุดเป็นอันดับ 1 ทั้งนี้การส่งออกสินค้าปัจจุบันให้ความสำคัญถึงคุณภาพและมาตรฐานการส่งออกเป็นสำคัญ หากสินค้ามีการปนเปื้อนจากโลหะหนัก ยาฆ่าแมลง และอื่นๆที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ อาจกระทบต่อปริมาณการส่งออกและความน่าเชื่อถือของสินค้าเกษตรไทย

โดยมีการแก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของแคดเมียมในหลายวิธี ได้แก่ การปลูกพืชทางเลือก เช่น อ้อย ดาวเรือง การจัดการด้วยการใช้สารเคมี เพอร์ริคคลอไรด์ (FeCl_3) แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) EDTA และปูนขาว เป็นต้น การถมหน้าดินโดยถมทับหน้าดินเดิม เป็นต้น การขุดลอกหน้าดินออกจากพื้นที่ ดังการศึกษาของจุไรรัตน์ อิมินา [5] การใช้พืชบำบัดแคดเมียมในดินนา พบว่า พืชที่ดูดแคดเมียมเข้าไปสะสมและมีปริมาณสูง หรือ Hyperaccumulator เมื่อจัดการให้เป็นเถาแล้ว จะยังคงมีปริมาณแคดเมียมสูงเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด จึงไม่สามารถเก็บเกี่ยวพืชที่ช่วยลดแคดเมียม นำไปเผาเป็นเถา แล้วนำไปทิ้งได้เลย จำเป็นต้องมีการจัดการเพื่อลดปริมาณแคดเมียมในเถาก่อนโดยการปรับเสถียรทำก้อนแข็งด้วยวิธี Cement-Based ในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการเก็บกากโลหะหนักจากเถาพืชปนเปื้อนด้วยปูนซีเมนต์ [6] พบว่า การกำจัดการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในดินและบำบัดด้วยวิธีการดูดซับโดยพืช หรือใช้ปูนขาวเพื่อเพิ่มค่า pH ในดิน เพราะจากการศึกษาแปลงทดลองในนาข้าว พบว่า ข้าวสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีในสภาพที่เป็นกรด เมื่อค่า pH ในดินเพิ่มขึ้นจนมีสภาพเป็นกลางหรือด่างการดูดซับแคดเมียมในต้นข้าวก็จะลดลง จึงควรส่งเสริมให้เกษตรกรใช้ปุ๋ยอินทรีย์ในการเพาะปลูกเพื่อลดการถูกดูดซับโดยพืช

จึงมีการศึกษาวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ ที่นำจุลินทรีย์ (จุลินทรีย์ปฏิปักษ์ antagonist) ในธรรมชาติมาควบคุมเชื้อโรคพืช และในปัจจุบันก็เป็นที่ยอมรับว่าเป็นวิธีที่มีโอกาสสูงในการ

นำไปเป็นกลยุทธ์ป้องกันกำจัดโรคพืช ตัวอย่างเช่น การใช้เชื้อ *Agrobacterium radiobacter* K84 ไปควบคุมโรคปมของพืชที่เกิดจากเชื้อ *A. tumefaciens* และ [5] การย่อยสลายสารไกลโฟเสททางชีวภาพของแบคทีเรียที่แยกได้จากดินในพื้นที่เพาะปลูก พบแบคทีเรียในกลุ่ม *Bacillus* เป็นกลุ่มที่ต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโต (aerobic bacteria) สามารถเจริญได้ดีที่อุณหภูมิต่ำจนถึงอุณหภูมิสูงและเจริญได้ดีในสภาวะที่มีพีเอช 2-11 ได้แก่ *Bacillus megaterium* *Bacillus subtilis* และ *Bacillus cereus* จากการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายไกลโฟเสทความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า *Bacillus subtilis* และ *Bacillus cereus* มีประสิทธิภาพในการย่อย 98.84% และ 98.46% ตามลำดับ ส่วน *Bacillus megaterium* มีประสิทธิภาพในการย่อย 85.94%

จากรายงานการวิจัยพบว่า จุลินทรีย์มีความสามารถในการกำจัด กักเก็บ แคดเมียมไว้ในเซลล์ ประกอบกับมีอัตราการเจริญเติบโตรวดเร็ว ทำให้มีพื้นที่ผิวในการกำจัดโลหะหนักสูงและเป็นการบำบัดที่ใช้ต้นทุนต่ำ [7] การบำบัดดินด้วย *Proteobacteria* และ *Geobacter* สามารถลดการสะสมของแคดเมียมในดินและเมล็ดข้าวได้ [8] โดยที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรียมีกลุ่มแอนไอออน ที่จำเพาะและสามารถจับกับแคดไอออนของโลหะหนักได้ [9] นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้จุลินทรีย์ในการบำบัดดินสามารถลดการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าวได้และการใช้แบคทีเรียสายพันธุ์ผสมสามารถลดการสะสมของแคดเมียมในดินได้ 20 – 40% และลดการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าวได้ 25 - 31% [10]

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและศึกษาการลดปริมาณแคดเมียมในดิน เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดิน และลดปริมาณแคดเมียมในดินสำหรับการปลูกข้าว และพื้นที่การเกษตร

วิธีการวิจัย

1. การวางแผนการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพของสารชีวภัณฑ์และสารละลายไคโตซานที่ส่งผลต่อการสะสมของแคดเมียมในดิน เพื่อหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ โดยออกแบบการทดลองภายในโรงเรือนควบคุมสภาพแวดล้อม การให้น้ำและอื่นๆ ศึกษาปัจจัยการปลูกข้าวกับปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ โดยไม่มีการปลูกข้าวในหน่วยทดลอง (Non plantation) มีการวิธีการปลูกข้าวแบบปกติที่ใช้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์เปรียบเทียบกับปลูกข้าวโดยการใส่ผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์ที่มีจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงสมบัติดิน ในอัตราส่วนมีความเข้มข้น 100-500 มิลลิกรัมต่อไร่ ใส่ผลิตภัณฑ์สารชีวภัณฑ์ที่มีสารไคโตซานเป็นประโยชน์ต่อผลผลิต ในอัตราส่วนมีความเข้มข้น 100-500 มิลลิกรัมต่อไร่ ซึ่งออกแบบการทดลองที่มีแผนแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (CRD) ทั้งหมด 12 หน่วยการทดลอง ๆ ละ 5 ซ้ำ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 1 CH คือ หน่วยการทดลองที่มีการปลูกข้าวแบบปัจจุบันที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 16-20-0 ใช้ในอัตรา 20 กิโลกรัมต่อไร่

การทดลองที่ 2 OR คือ หน่วยทดลองที่มีการปลูกข้าวแบบปัจจุบันที่มีการไม่ใส่ปุ๋ยเคมี โดยใส่ปุ๋ยอินทรีย์ใช้ในอัตรา 500 กิโลกรัมต่อไร่

- MIC คือ การปลูกข้าวโดยใช้สารชีวภัณฑ์ ในอัตราส่วนความเข้มข้น 100-500 มิลลิกรัมต่อไร่ ประกอบด้วย

การทดลองที่ 3 หน่วยการทดลองใส่สารชีวภัณฑ์ 100 มิลลิกรัมต่อไร่ (MIC100)

การทดลองที่ 4 หน่วยการทดลองใส่สารชีวภัณฑ์ 200 มิลลิกรัมต่อไร่ (MIC200)

การทดลองที่ 5 หน่วยการทดลองใส่สารชีวภัณฑ์ 300 มิลลิกรัมต่อไร่ (MIC300)

การทดลองที่ 6 หน่วยการทดลองใส่สารชีวภัณฑ์ 400 มิลลิกรัมต่อไร่ (MIC400)

การทดลองที่ 7 และหน่วยการทดลองใส่สารชีวภัณฑ์ 500 มิลลิกรัมต่อไร่ (MIC500)

- CHI คือ การปลูกข้าวโดยใช้สารละลายไคโตซานในอัตราส่วนมีความเข้มข้น 100-500 มิลลิกรัมต่อไร่ ประกอบด้วย

การทดลองที่ 8 หน่วยการทดลองใส่สารไคโตซาน 100 มิลลิกรัมต่อไร่ (CHI100)

การทดลองที่ 9 หน่วยการทดลองใส่สารไคโตซาน 200 มิลลิกรัมต่อไร่ (CHI200)

การทดลองที่ 10 หน่วยการทดลองใส่สารไคโตซาน 300 มิลลิกรัมต่อไร่ (CHI300)

การทดลองที่ 11 หน่วยการทดลองใส่สารไคโตซาน 400 มิลลิกรัมต่อไร่ (CHI400)

การทดลองที่ 12 และหน่วยการทดลองใส่สารไคโตซาน 500 มิลลิกรัมต่อไร่ (CHI500)

2. การเตรียมดิน

ดินที่ใช้ในการทดลองเป็นกลุ่มชุดดินที่ 35 ชุดดินหางฉัตร (Hang Chat series: Hc) จากพื้นที่ทำนาของเกษตรกรของบ้านโซ่ ตำบลแม่ณาเรือ อำเภอเมืองจังหวัดพะเยา เก็บตัวอย่างดินที่ระดับชั้นผิวดิน 0-30 cm จากนั้นวิเคราะห์สมบัติของดิน ดังตาราง 2 สมบัติของดินก่อนการทดลองแบบเตรียมดินปนเปื้อนสังเคราะห์ โดยการเติมแคดเมียมไนเตรท ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) มีอัตราส่วนผสมดิน:สารละลายเท่ากับ 10:1 (ระดับการปนเปื้อนในดิน 500 mg/kg) นำดินร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm ก่อนบรรจุในถุงพลาสติกซีปล็อก ถุงละ 2.50 kg. นำสารละลายที่เตรียมไว้ 250 ml ผสมกับดินให้เข้ากัน บ่มดินในถุงพลาสติกเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ หลังจากนั้นจึงเปิดปากถุงผึ่งดินให้แห้งเป็นเวลา 2 สัปดาห์ [11] ดินที่เตรียมได้ผึ่งให้แห้งในที่ร่มคลุมเกล้า ควบคุมความชื้นและ สุ่มใช้ดินตามวิธีการของกรมพัฒนาที่ดิน [12] บรรจุดิน 15 kg ต่อกระถางในกระถางสีขาวทรงกระบอกที่บดแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24.00 cm และสูง 30.00 cm ใส่ดินที่ละชั้นเท่ากัน โดยควบคุมความหนาแน่นของดินที่ 1.93 kg/cm² ต่อกระถาง เติมน้ำและรักษาระดับน้ำผิวดินไว้ที่ 5.00 cm

3. การใช้สารชีวภัณฑ์

การทดลองนี้ใช้สารชีวภัณฑ์ที่ผลิตด้วยกระบวนการที่ควบคุมการผลิต และจำหน่ายโดย บริษัทไบร่งจำกัด จำนวน 2 ชนิด ได้แก่

1) สารชีวภัณฑ์จากจุลินทรีย์ เป็นน้ำหมักชีวภาพที่เตรียมจากจุลินทรีย์ ได้แก่ *Achormobacter* sp., *Azoto bacter* sp., *Bacillus* sp. และ *Nitrobacter* sp. โดยมีความเข้มข้นของจุลินทรีย์ไม่ต่ำกว่า 1.00×10^7 cell/gram (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2556) และได้รับมาตรฐาน Biological Pre-HACCP และ GMP โดย SGS.Contains

2) สารชีวภัณฑ์ไคโตซาน เป็นน้ำหมักชีวภาพที่ประกอบด้วยสารไคติน ไคโตซาน มีความเข้มข้นเท่ากับ 75 ppm [13] โดยผลิตจากวัตถุดิบที่เป็นผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำที่มีคุณภาพ เป็นส่วนผสมที่ผ่านการรับรองในระบบการผลิต การผลิต และตามมาตรฐานการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำที่ดี (GAP) ของกรมประมง [14]

4. การศึกษาผลของสารชีวภัณฑ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติดิน

ติดตามการเปลี่ยนแปลงของสมบัติดินทุก 30 วัน โดยเก็บตัวอย่างดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน นำตัวอย่างดินผิวดินที่รุ่มจนแห้ง และนำมาวิเคราะห์สมบัติดินดังนี้

1) ความเป็นกรดต่าง (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (EC) วัดโดยใช้อัตราส่วนดินต่อน้ำ เท่ากับ 1: 1 วัดค่าโดยใช้เครื่องมือวัดปฏิกิริยาดิน pH meter และ EC meter

2) อินทรีย์วัตถุ (Organic matter) โดยวิธี Walkley-Black titration (Walkley and Black, 1934)

3) ไนโตรเจนรวม (Total nitrogen) โดยวิธี Kjeldahl method (Black, 1965)

4) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available phosphorus) โดยวิธี Bray II (Bray and Kurtz, 1945)

5) โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Available potassium) ใช้สกัดด้วยแอมโมเนียมอะซิเตต ความเข้มข้น 1 N ที่เป็นกลาง (pH 7) (Pratt, 1965) วัดปริมาณโดยใช้ atomic absorption spectrophotometer (AAS)

5. การศึกษาผลของสารชีวภัณฑ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมในดิน

ติดตามการเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมในดินทุก 30 วัน โดยเก็บตัวอย่างดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน นำตัวอย่างดินผิวดินที่รุ่มจนแห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรง 100.00 meshes ชั่งดิน 1.00 g ย่อยด้วย aqua regia (ส่วนผสมระหว่าง HCl: HNO₃ : HNO₃ – HClO₄ (1:3:1 v/v)) [14] วิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในดินด้วย Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ที่ความยาวคลื่น 228.80 นาโนเมตร slit width 0.50 นาโนเมตร และ Flame type Air-acetylene โดยทดสอบการได้กลับคืนของสารที่ทราบปริมาณ (Recovery of spiked sample) พบว่าร้อยละการกลับคืน (%recovery) เท่ากับ 99 % (เกณฑ์การยอมรับได้อยู่ระหว่าง 98-110%) และการวิเคราะห์ซ้ำในตัวอย่างเดียวกัน 2 ซ้ำ (Duplicate analysis pair) เพื่อหาความแตกต่างของการทดสอบ 2 ซ้ำ พบว่าร้อยละความแตกต่างสัมพัทธ์ (Relative Percent Difference; %RPD) เท่ากับ 6.8% (%RPD ที่ยอมรับได้ต้องไม่เกิน 10%)

จากนั้นรายงานข้อมูลตามระยะการเจริญของข้าว ได้แก่ ระยะการเจริญ (Vegetative Phase: VP) ระยะตั้งท้อง (Reproductive Phase: RP) ระยะเก็บเกี่ยว (Harvest Phase: HP)

5. การวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ของสมบัติของดินและปริมาณแคดเมียมในดิน

ผลการศึกษา

1. คุณสมบัติดินก่อนการทดลอง

ผลการศึกษาสมบัติของดินก่อนการทดลองพบว่า ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) เท่ากับ $31.00 \mu\text{S}/\text{cm}^3$ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 7.76 อนุภาค

ดิน (Soil particles) ประกอบด้วย ดินทราย 10.00% ดินร่วน 52.00% ดินเหนียว 38.00% เนื้อดิน (Soil Texture) ลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียวปนตะกอน (Silty Clay Loam) ควบคุมความหนาแน่นเท่ากับ $1.93 \text{ kg}/\text{cm}^3$ ดังตาราง 1 สมบัติของดินก่อนการทดลอง

ตาราง 1 สมบัติของดินก่อนการทดลอง

Soil parameters (Avg.)	pH	Electrical Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	OM (%)	Total N (%)	P ₂ O ₅ (mg/kg)	K ₂ O (mg/kg)	Cd (mg/kg)
Values	7.76	31.00	33.10	3.22	1.31	32.57	104.20
CV (%)	0.11	0.27	0.06	0.03	0.17	0.08	0.02

2. คุณสมบัติดินหลังการทดลอง

การทดลองใช้สารชีวภัณฑ์และสารละลายไคโตซานเพื่อลดปริมาณแคดเมียมในดินนั้นได้มีการติดตามการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเคมี ได้แก่ อินทรีย์วัตถุในดิน (OM) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) โดยในการทดลองนี้ใช้ FAO Project Staff (1973) และ Soil Survey Division Staff [16] ในการเปรียบเทียบการประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

ก่อนการทดลองมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเท่ากับ 3.31 % เมื่อทดสอบด้วย MIC และ CHI พบมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ลดลงตามระยะการเจริญของพืช คือ VP>RP>HP ตามลำดับ โดยการทดลอง CH>MIC>CHI>OR และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินการทดลอง CH ลดลงมีค่าเท่ากับ 2.85% การทดลองที่ใช้สารชีวภัณฑ์มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินของการทดลอง MIC300>MIC500>MIC400>MIC200>MIC100 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินระหว่าง 2.80-2.00% ส่วนการใช้สารละลายไคโตซานพบว่าการทดลอง CHI500>CHI300>CHI400>CHI200>CHI100 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินระหว่าง 2.70-2.90% ในระยะ HP เป็นระยะที่มีการลดลงของอินทรีย์วัตถุในดินมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบ

กับอินทรีย์วัตถุในดินเริ่มต้น (3.31%) พบว่า OR (2.44%) มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินปานกลางลดลง 0.87% คิดเป็น 26.28% (เทียบกับปริมาณอินทรีย์วัตถุก่อนการทดลอง = 3.31%) ซึ่งลดลงมากกว่าการทดลอง CHI100>CHI200>CHI400>MIC100 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินระหว่าง 2.72-2.82% ลดลง 0.49-0.59% คิดเป็น 14.89-17.78% (เทียบกับปริมาณอินทรีย์วัตถุก่อนการทดลอง = 3.31%) ในขณะที่การทดลอง CH, MIC400, MIC500 และ MIC300 มีอินทรีย์วัตถุในดินระหว่าง 2.80 – 3.03% ลดลง 3.78 - 4.56% คิดเป็น 11.42 -13.77% (เทียบกับปริมาณอินทรีย์วัตถุก่อนการทดลอง = 3.31%) ซึ่งมีค่าลดลงเล็กน้อยแต่ยังมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับมาตรฐาน (FAO, 1993)

2.2 ปริมาณไนโตรเจนในดิน

ปริมาณไนโตรเจนในดิน ก่อนการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.32% มีปริมาณไนโตรเจนปานกลางเมื่อทดสอบด้วย MIC และ CHI พบว่าปริมาณไนโตรเจนในดิน เพิ่มขึ้นในระยะ VP โดย MIC มีค่ามากที่สุดระหว่าง 0.38- 0.42% เพิ่มขึ้น 0.54- 1.00% คิดเป็น 16.72-31.06% (ปริมาณไนโตรเจนก่อนการทดลอง = 0.32%) CHI มีปริมาณไนโตรเจนในดินระหว่าง 0.38-0.39% เพิ่มขึ้น 0.57- 0.74% คิดเป็น 17.70-22.83% (ปริมาณไนโตรเจนก่อนการทดลอง = 0.32%) ขณะที่

CH และ OR มีปริมาณไนโตรเจนในดินเพิ่มขึ้น 18.01% และ 19.41% ตามลำดับ แต่ปริมาณไนโตรเจนในดินเริ่มลดลงในระยะ RP>HP แต่ยังมีปริมาณไนโตรเจนในดินปานกลางเมื่อเทียบกับมาตรฐาน (FAO, 1993) ซึ่งปริมาณไนโตรเจนในดินของการทดลอง MIC>CHI>OR > CH และพบว่า การทดลอง CH มีปริมาณไนโตรเจนในดินเท่ากับ 0.37 % ในขณะที่การทดลอง MIC400>MIC300>MIC200>MIC500>MIC100 มี ปริมาณไนโตรเจนในดินระหว่าง 0.37-0.46% ส่วนการใช้สารละลายโคโคซานพบว่า CHI300> CHI400> CHI500 >CHI200 >CHI100 โดยมีปริมาณไนโตรเจนในดินระหว่าง 0.38% (รูป 2)

2.3 ปริมาณฟอสฟอรัสในดิน

จาก รูป 3 ปริมาณฟอสฟอรัสในดิน พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสในดิน ก่อนการทดลองมีค่าเท่ากับ 1.31 mg/kg ซึ่งมีปริมาณฟอสฟอรัสในดินต่ำมากเมื่อเทียบกับมาตรฐาน (FAO, 1993) แต่เมื่อทดสอบด้วย MIC และ CHI พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสในดิน เพิ่มขึ้นในระยะ VP>RP>HP ตามลำดับ โดย CH มีปริมาณฟอสฟอรัสในดิน เท่ากับ 7.37 mg/kg ส่วนการทดลอง OR, MIC และ CHI มีค่าใกล้เคียงกันโดยมีปริมาณฟอสฟอรัสในดินระหว่าง 11.54 - 12.63 mg/kg เพิ่มขึ้น 0.82-1.03 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับ CH ทำให้ในระยะ HP ปริมาณฟอสฟอรัสอยู่ในระดับปานกลางตามมาตรฐาน (FAO, 1993)

2.4 ปริมาณโพแทสเซียมในดิน

ปริมาณโพแทสเซียมในดิน ก่อนการทดลองมีค่าเท่ากับ 32.57 mg/kg ซึ่งมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับมาตรฐาน (FAO, 1993) ดังรูป 4 ปริมาณโพแทสเซียมในดิน เมื่อทดสอบด้วย MIC และ CHI พบว่าปริมาณโพแทสเซียมในดินเพิ่มขึ้น แต่ในระยะ VP <RP<HP โดยการทดลอง MIC>CH>CHI>OR พบว่า การใช้สารชีวภัณฑ์ IC500>MIC400>MIC300>MIC200>MIC100 มีปริมาณโพแทสเซียมในดินตั้งแต่ 38.07 - 44.21 mg/kg และการใช้สารละลายโคโคซานพบว่า CHI500>CHI400>CHI300>CHI200>CHI100 มีปริมาณ K ตั้งแต่ 32.71 -

38.87 mg/kg ในระยะ HP พบว่า CH เป็นการทดลองที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี มีปริมาณโพแทสเซียมมากที่สุด เท่ากับ 49.04 mg/kg เพิ่มขึ้น 16.47 mg/kg คิดเป็น 50.56% แต่ยังมีปริมาณโพแทสเซียมในดินต่ำ รองลงมา ได้แก่ MIC500 มีปริมาณโพแทสเซียมในดินเท่ากับ 44.21 mg/kg เพิ่มขึ้น 11.64 mg/kg คิดเป็น 35.73% และน้อยที่สุด คือ CHI100 มีปริมาณโพแทสเซียมในดินเท่ากับ 32.71 mg/kg เพิ่มขึ้น 0.14 mg/kg คิดเป็น 0.44% โดยมีลำดับปริมาณโพแทสเซียมในดิน ดังนี้

CH>MIC500>MIC400>OR>MIC300>CHI500>MIC100>MIC200>CHI400>CHI300>CHI200>CHI100 ตามลำดับ

นอกจากนี้พบว่าค่าความเป็นกรดต่างและค่าการนำไฟฟ้าของดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้สารชีวภัณฑ์ สารละลายโคโคซาน และระยะการเจริญโดย HP>RP>VP ซึ่งค่าความเป็นกรดต่างมีค่าระหว่าง 7.00-9.00 และค่าการนำไฟฟ้าของดินมีค่าระหว่าง 26-47 $\mu\text{S}/\text{cm}$

2.5 ค่าความเป็นกรด ต่าง (pH)

จากรูป 5 ความเป็นกรดต่างในดิน ก่อนการทดลองมีค่าเท่ากับ 7.76 ซึ่งมีค่าเป็นด่างเล็กน้อย (FAO,1993) เมื่อทดสอบด้วย MIC และ CHI พบว่าค่าความเป็นกรดต่าง ในดินเพิ่มขึ้น ในระยะ VP<RP<HP โดยการทดลอง MIC>CHI>OR>CH ในระยะ HP การใช้สารชีวภัณฑ์ MIC500>MIC400>MIC300>MIC200>MIC100 โดยมีค่าระหว่าง 8.13-8.44 ซึ่งเป็นด่างปานกลาง (FAO,1993) ส่วนการใช้สารโคโคซานพบว่า CHI400>CHI300>CHI200>CHI100>CHI500 มี ค่า ความเป็นกรดต่าง ระหว่าง 8.22-8.37 เป็นด่างปานกลาง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความเป็นกรด ต่าง ในระยะ HP ของการทดลอง CH และ OR ลดลงจากเดิม 1.10 และ 0.82 ส่วนการทดลองที่ใช้สารชีวภัณฑ์และโคโคซานมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่าง 0.37-0.68

2.6 ค่าการนำไฟฟ้า (EC)

จากรูป 6 ค่าการนำไฟฟ้าในดินก่อนการทดลองมีค่าเท่ากับ 31 $\mu\text{S}/\text{cm}$ เมื่อทดสอบด้วย MIC และ CHI

พบว่าค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามระยะการเจริญของพืช โดย $VP < RP < HP$ ซึ่งในระยะ HP พบว่า CHI และ OR มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 10.50 $\mu S/cm$ และ 5.00 $\mu S/cm$ ตามลำดับ การทดลองที่ใช้สารชีวภัณฑ์พบว่า $MIC500 > MIC400 > MIC300 > MIC200 > MIC100$ โดยมีค่าระหว่าง 36.00-47.00 $\mu S/cm$ เพิ่มขึ้น 16.13-53.25% ส่วนการทดลองที่ใช้ไคโตซานพบว่า $HI500 > CHI400 > CHI200 > CHI300 > CHI100$ โดยมีค่าระหว่าง 35.00-47.50 $\mu S/cm$ เพิ่มขึ้นจากเดิม 12.90-53.23%

3. ปริมาณแคดเมียมในดิน

จากการเตรียมดินปนเปื้อนสังเคราะห์ โดยดินที่ใช้ในการปลูกข้าวพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ Cd ในระยะ VP มากกว่า HP ดินที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณแคดเมียมในดินมีค่าเท่ากับ 104.20 mg/kg และในดินของ CH ซึ่งเป็นการทดลองที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี ในระยะ HP เป็นระยะที่มีการลดลงของแคดเมียมน้อยที่สุด มีการลดลงของแคดเมียมในดินน้อยที่สุด CH มีค่าเท่ากับ 94.57 mg/kg ลดลงจากระยะ RP เพียง 1.34 mg/kg ในขณะที่ VP ลดลงจากเริ่มต้น (104.2 mg/kg) 8.08 mg/kg. ในขณะเดียวกัน OR เป็นการทดลองที่ใช้ปุ๋ยอินทรีย์ มีปริมาณแคดเมียมในระยะ HP เท่ากับ 77.45 mg/kg ลดลงจาก RP 3.48 mg/kg ในระยะ VP ลดลง 20.82 mg/kg การลดลงของแคดเมียมใกล้เคียงกับ MIC100 (20.85 mg/kg) ซึ่งมากกว่า CH 2.50-2.80 เท่า และดินที่มีปริมาณแคดเมียมลดลงมากที่สุดคือ MIC500 (36.45 mg/kg) และรองลงมาคือ MIC300 (45.83 mg/kg) โดยปริมาณแคดเมียมลดลง เฉลี่ยระหว่าง 8-69% ซึ่ง MIC500 ในระยะ VP มีปริมาณแคดเมียมลดลง MIC500 เท่ากับ 38.38 mg/kg (ลดลง 63.16%) ซึ่งน้อยกว่าการทดลองอื่น และพบว่า MIC300 และ MIC500 ปริมาณแคดเมียมลดลง 50-60 mg/kg (60-65%)

การทดลอง MIC500 ในระยะ VP มีปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 38.38 mg/kg ลดลง 65.82 mg/kg (63.16%) ซึ่งลดลงมากกว่า CHI500 มีปริมาณแคดเมียมเท่ากับ 88.65 mg/kg ลดลง 15.55 mg/kg (14.92%)

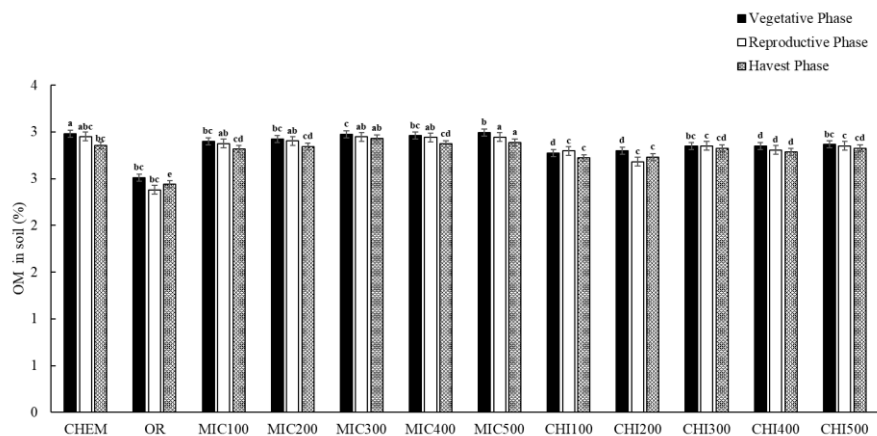
พบว่าการทดลองที่มีการใช้สารชีวภัณฑ์มีปริมาณแคดเมียมลดลง 20.00-70.00 mg/kg ในขณะที่การทดลองที่ใช้สารละลายไคโตซานมีปริมาณแคดเมียมลดลง 10.00-20.00 mg/kg โดยลดลงมากกว่า CH 2.50-8.00 เท่า และ 1.30-2.00 เท่า ตามลำดับ ทั้งนี้ลำดับปริมาณ ปริมาณ ในดินที่ลดลงตามลำดับ คือ $MIC > CHI > OR > CH$ โดยการใช้สารชีวภัณฑ์แสดงให้เห็นว่า $MIC500 > MIC400 > MIC300 > MIC200 > MIC100$ เช่นเดียวกับการใช้สารละลายไคโตซานซึ่ง $CHI500 > CHI400 > CHI300 > CHI200 > CHI100$ ดังรูป 5 ปริมาณแคดเมียมในดิน และในช่วงการทดลองพบว่าปริมาณแคดเมียมในดินที่ลดลงในช่วง $VP > RP > HP$ ทั้งนี้ MIC500 เป็นหน่วยการทดลองเดียวที่ในหนึ่งรอบการใช้ดินที่มีปริมาณแคดเมียมผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ คุณภาพดิน ที่มีค่าน้อยกว่าไม่เกิน 37.00 mg/kg (มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม, กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม)

นอกจากนี้พบว่า ปริมาณแคดเมียม ในดินแปรผันตรงกับค่า ปริมาณสังกะสีในดิน โดยที่ในช่วง VP มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 2.50 mg/kg ส่วนการทดลองอื่น ๆ มีปริมาณสังกะสีระหว่าง 1.40 -1.80 mg/kg¹ และในช่วง HP ค่า ปริมาณสังกะสีในดินลดลง 0.25 -1.40 mg/kg โดยที่ CH มีค่าสูงที่สุด (1.4 mg/kg¹) และ MIC500 มีค่าต่ำสุด (0.25 mg/kg) สอดคล้องกับแนวโน้มการลดลงของปริมาณแคดเมียมในดิน และปริมาณแคดเมียมในดินยังมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับอินทรีย์วัตถุในดิน อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) ดังตาราง 2

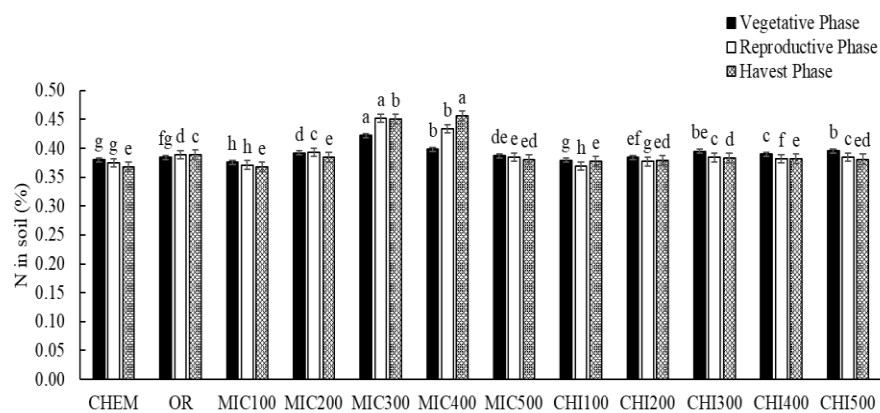
ตาราง 2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแคดเมียมและธาตุอาหารในดิน

	อินทรีย์วัตถุในดิน	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	โพแทสเซียม
แคดเมียม	0.496**	-0.675**	-0.381**	-0.434**

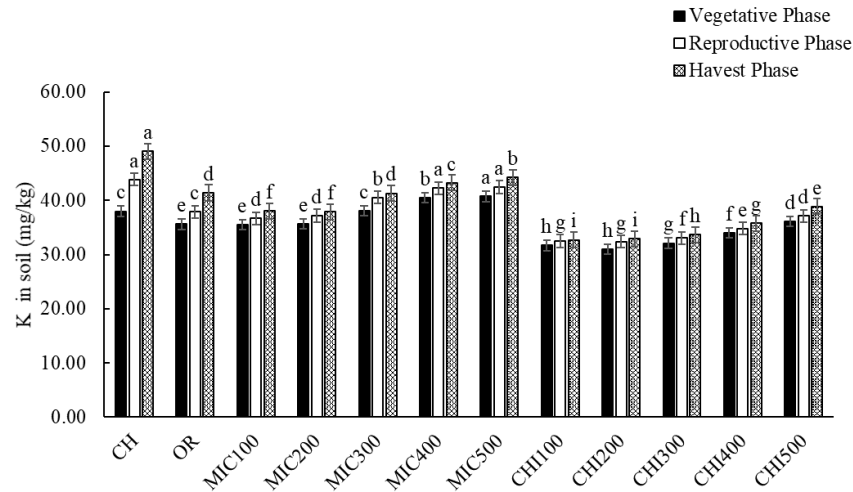
หมายเหตุ: **p<0.01



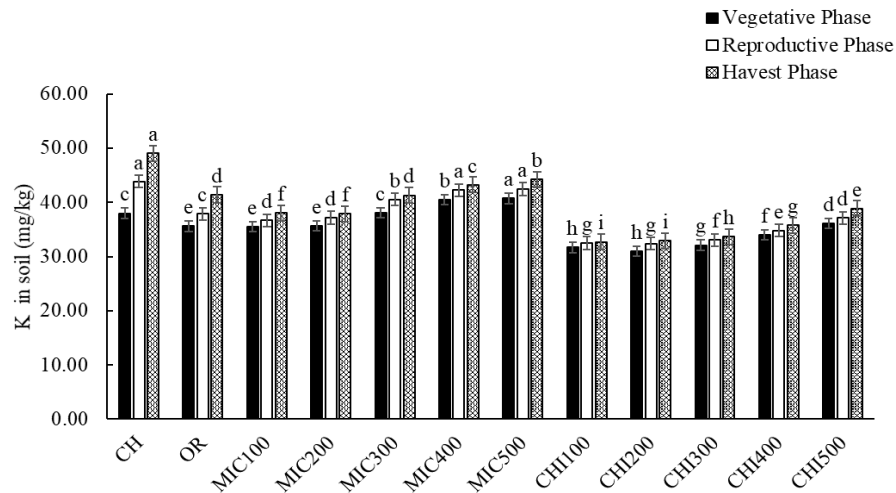
รูป 1 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน



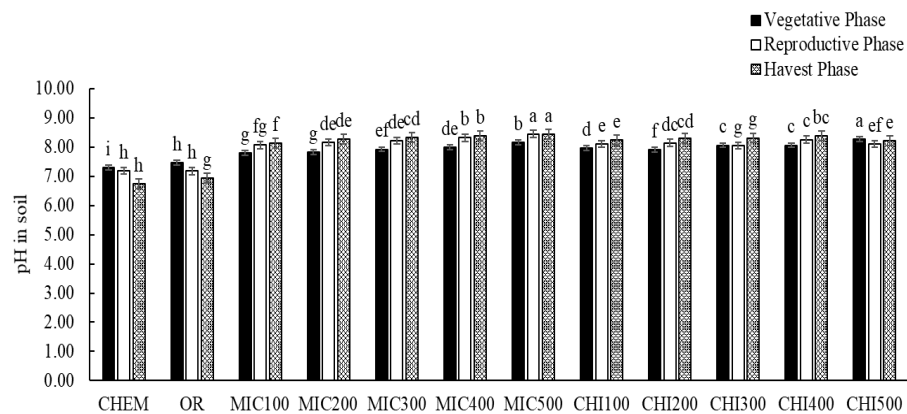
รูป 2 ปริมาณไนโตรเจนในดิน



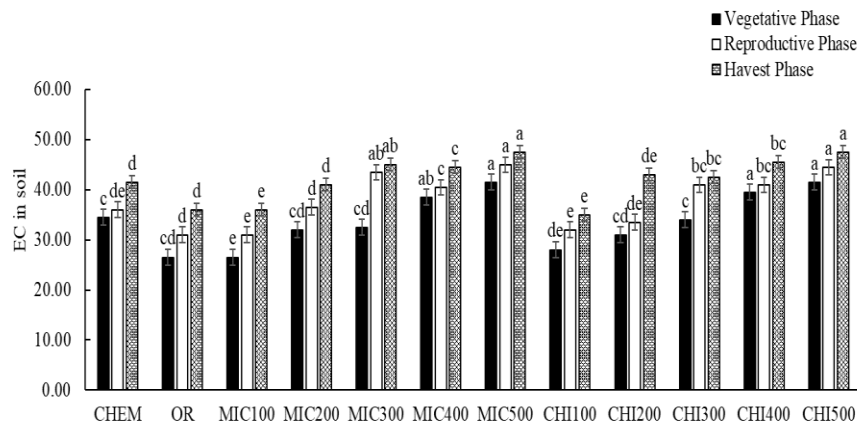
รูป 3 ปริมาณโพสฟอรัสในดิน



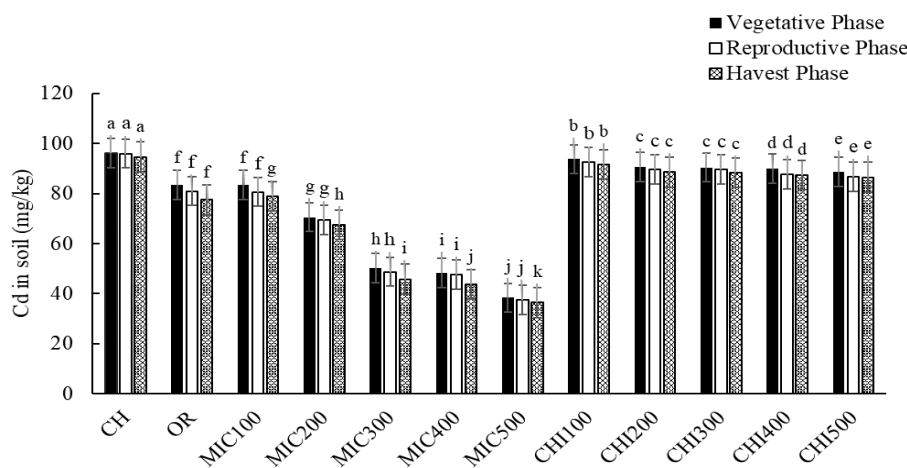
รูป 4 ปริมาณโพสฟอรัสในดิน



รูป 5 ค่าความเป็นกรด ด่าง (pH)



รูป 6 ค่าการนำไฟฟ้า (EC)



รูป 7 ปริมาณแคดเมียมในดิน

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกัน แสดงความแตกต่างกันทางสถิติ โดยวิธี Duncan' multiple range ที่ $P < 0.05$

วิจารณ์

จากการทดลองซึ่งต้องรักษาระดับน้ำผิวดินไว้ที่ 5.00 cm เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมเสมือนการทำงานข้าว พบว่าทุกหน่วยทดลองมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินลดลง จากปริมาณเริ่มต้น 3-10 g/kg เนื่องจากจุลินทรีย์ในสารชีวภัณฑ์ที่เติมลงไปในการดินเกิดการใช้อินทรีย์วัตถุในดินเพื่อการเจริญและเพิ่มจำนวน จึงเป็นสาเหตุให้อินทรีย์วัตถุในดินในลดลง เป็นสาเหตุให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นในช่วง 8.00-8.50 หลังจากนั้นจุลินทรีย์ในดินจึงทำหน้าที่ในการตรึงไนโตรเจน และย่อย

อินทรีย์วัตถุในดินซึ่งเป็นผลดีต่อการเจริญของพืช สอดคล้องกับ [17] การทดลองเติมปุ๋ยคอกและปุ๋ยเคมีในดิน จากนั้นพบการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียกลุ่มตรึงไนโตรเจน (*Nitrobacter*) $1-5 \times 10^4$ g dry soil โดยเพิ่มจำนวนจาก 0.10 mM - 5.00 mM คิดเป็น 95% ซึ่งทำให้เกิดการเพิ่มแร่ธาตุในรูปแอมโมเนียม ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนโตรเจนในดิน จากเดิม 32.57 g/kg เป็น 33.00 – 50.00 g/kg

ในการขังน้ำมีผลต่อการให้ออกซิเจนแก่ดิน โดยจุลินทรีย์ในสารชีวภัณฑ์ซึ่งเป็นกลุ่ม aerobc ได้ใช้ O_2 ที่

มีในดิน และกลุ่ม facultative มีการเพิ่มจำนวนขึ้นโดยให้องค์ประกอบดินอยู่ในสภาพ Oxidize แลผลผลิตที่ได้จากอินทรีย์วัตถุ เช่น ตัวรับ อิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจ และ thermodynamic sequence ของดินลดลง [18] หลังจุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนที่มีในดิน Eh จะลดลงอย่างรวดเร็วหลังขังน้ำ ทำให้ดินเข้าสู่สภาวะรีดักชัน (Reduction potential stage) สาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงค่า Eh จากสภาวะ Oxidation (>300 mV) ลดลงและเข้าสู่สภาวะ reduction (<300 mV) และเกิดการเปลี่ยนแปลงในด้านความเค็มของสารละลาย ในดินซึ่งทำให้เกิดการเพิ่ม pH [19] ซึ่ง [18] อธิบายว่า การเพิ่มของ pH ของดินเกี่ยวข้องโดยตรงกับการลดลงของ Fe (III) เป็น Fe (II) สามารถอธิบายได้ โดยสมการ $Eh = 1.06 - 0.059 \log Fe^{2+} - 0.177 pH$ หรือ $Eh = 17.87 + p Fe^{2+} - 3pH$ และเนื่องจากไคโตซานมี adsorption capacity สำหรับไอออนของโลหะหนัก คือ amine group และ free hydroxyl จำนวนมาก [20] การเพิ่มของ pH ทำให้ ไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อยลงและปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH) เพิ่มขึ้นจึงทำให้ไคโตซานสามารถดูดซับไอออนบวกของโลหะหนัก Cd ได้มากขึ้น เนื่องมาจากหมู่อะมิโนที่แพร่กระจายในไคโตซานสามารถสร้างพันธะร่วมระหว่าง chitosan-Cd²⁺ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้ปริมาณแคดเมียมลดลง และ [21] ทำการศึกษาอิทธิพลของ percolation patterns ต่อการเคลื่อนที่ของธาตุอาหาร ในนาข้าว พบว่าหลังจากขังน้ำที่ผิวดิน vertical percolation rate จะลดลงอย่างต่อเนื่อง และหลังการขังน้ำ 50 วัน ซึ่งอยู่ในช่วง VP-RP จึงเข้าสู่สภาวะ reduction และส่งผลให้ค่า pH ในดินเพิ่มขึ้น

โดย [22] ทดลองเพิ่มค่า pH ของดิน และจากผลการทดลองพบว่า Cd ในดินมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ OM content สอดคล้องกับผลการศึกษา [23] [24] ความสามารถในการละลายของโลหะหนักภายใต้ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกัน 3.30, 5.00 และ 8.00 และศักย์รีดอกซ์ 325 mV, 0 mV และ -100 mV ผลปรากฏว่าโลหะสามารถละลายได้เพียงเล็กน้อยภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 8.00 การเพิ่มขึ้นของความเป็นกรด-ด่างจะทำให้ประจุลบ

บริเวณผิวหน้าของเซลล์แบคทีเรียเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมเพิ่มขึ้นในแบคทีเรียค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักเท่ากับ 4-7 สอดคล้องกับผลการศึกษา [25] การดูดซับไอออนบวกที่พื้นผิวเซลล์ของจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งสัมพันธ์กับปฏิกิริยาของโปรตอนออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ กับหมู่ฟังก์ชันบางอย่างภายในสารชีวโมเลกุล และอินทรีย์วัตถุมีความสามารถในการดูดซับสูงที่ค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 5 ขึ้นไป เมื่อเปรียบเทียบปริมาณอินทรีย์วัตถุกับปริมาณแคดเมียมในดินตามระยะการเจริญเติบโต พบปริมาณแคดเมียมในดินนั้นแปรผันตามกับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ดังรูป 1 และรูป 5 พบว่าสารชีวภัณฑ์สามารถ ลดการสะสมของแคดเมียมในดินได้ทั้งในดินที่เกิดการปนเปื้อนใหม่ โดยแคดเมียมจะยึดเหนี่ยวกับคาร์บอนेट และดินที่เกิดการปนเปื้อนเป็นระยะเวลานานแคดเมียมในดินจะอยู่ในรูป iron manganese oxide bound และรูป organic matter bound

สาเหตุเกิดจากการเติมปุ๋ยเคมีที่ใช้สำหรับการเพาะปลูกแต่ไม่มีการปลูกข้าวจึงเกิดการสะสมของแคดเมียมในดินทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะหนักกับสารอินทรีย์ในดิน โดยแอนไอออนของสารอินทรีย์ดูดซับแคดไอออนของโลหะหนัก และแอนไอออนของสารอินทรีย์สร้างสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนคู่กับโลหะ [26] เกิดการสะสมของปุ๋ยตั้งแต่ระยะ VP ปริมาณแคดเมียมในดินจึงเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ [27] กล่าวว่า การเติมปุ๋ยฟอสเฟตจะเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดินมากถึงร้อยละ 80-87 และความเข้มข้นของแคดเมียมในการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 94.8 µg/L และ 276 µg/L ในระยะเวลา 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

นอกจากนี้ในระยะ HP เป็นระยะที่ปริมาณแคดเมียมและอินทรีย์วัตถุลดลงมากกว่าในระยะอื่น และในการทดลอง MIC500 อินทรีย์วัตถุในดินลดลง 4.23 g/kg และการทดลอง OR ลดลงมากที่สุดเท่ากับ 8.70 g/kg ในขณะที่ปริมาณแคดเมียมในดินการทดลอง

MIC500 ลดลงมากที่สุดในระยะ HP 67.75 mg/kg CHI500 ลดลง 17.68 mg/kg ส่วน CH ลดลง 9.63 mg/kg สอดคล้องกับ [23] ปริมาณแคดเมียมมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับอินทรีย์วัตถุในดิน โดยขณะที่ความเข้มข้นแคดเมียมในดินลดลงจาก 12 เป็น 2.30 $\mu\text{g/g}$ อินทรีย์วัตถุในดินก็ลดลงจาก 1.00 เป็น 0.50 mg/g

ส่วนการทดลองที่ใช้สารละลายไคโตซาน พบว่าสามารถลดปริมาณแคดเมียมในดินได้เช่นกันโดยลดลง 10-17% ซึ่งลดลงตามปริมาณการใช้ ในระยะ HP การทดลอง CHI500 ลดลงได้มากที่สุด เท่ากับ 16.97% (17.68 mg/kg) และน้อยที่สุดคือ CHI100 ลดลง 12.09% (12.60 mg/kg) สอดคล้องกับ [28] การทดลองเติมไคโตซานในชั้นดิน 5 cm จากความเข้มข้น 0.45, 0.60, 0.75, 0.90 และ 1.05 g/kg ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในดินลดลงอย่างต่อเนื่องโดยลดลงจาก 14-30 mg/kg เป็น 3-8 mg/kg ในเวลา 35 วัน โดยการใช้ไคโตซาน 1.05 g/kg มากที่สุดทำให้ปริมาณแคดเมียมในดินลดลงมากที่สุดเช่นกัน เนื่องจากหุ้มนิวทรีนที่แพร่กระจายในไคโตซานสามารถสร้างพันธะร่วมระหว่าง chitosan- Cd^{2+} เป็นสารประกอบเชิงซ้อน และสอดคล้องกับการทดลอง [29] ใช้ไคโตสารเป็นตัวดูดซับในการลดแคดเมียมในดินพบว่าสามารถลดลงได้ 2.90 เท่าเทียบกับระบบอื่นเช่นการดูดซับด้วยอินทรีย์จากธรรมชาติเริ่มต้นของแคดเมียม 2000 $\mu\text{g/l}$ ลดลง 80%

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการพัฒนาและประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ชีวภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าและฟื้นฟูดินจากมลพิษอย่างมีแบบแผน เพื่อสร้างความมั่นคงเกษตรอินทรีย์แบบก้าวกระโดด ภายใน 1 ปี ; โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ปีงบประมาณ 2558 ภายใต้การดำเนินการของสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม(สทว)และบริษัทไบรง จำกัด

เอกสารอ้างอิง

1. Abdus - Salam N, Bello M. O. Kinetics, thermodynamics and competitive adsorption of lead and zinc ions onto termite mound. International Journal of Environmental Science and Technology. 2015;12:3417-3426.
2. Knowledge of disease. [Internet]. Thailand: Office of Occupational and Environmental Diseases. 2019 April [cited 2019 April 3]. Available from: <http://envocc.ddc.moph.go.th>.
3. Anongnat S, Pornthiwa K, Kumiko O, Toru M. Current situation of cadmium-polluted paddy soil, rice and soybean in the Mae Sot District, Tak Province, Thailand. Soil Science and Plant Nutrition.2012;270:349 -359.
4. Wanida N. Effects of heavy metals in organic materials on soil and plant quality. Soil Science Research Group Agricultural Production Research Bureau Department of Agriculture. Thailand. 2010; 1-84.
5. Sangdaw K, et al. Phytoremediation of Cadmium Contaminated Paddy Soil at Mae Sot District, Tak Province. Kasetsart University. 2013.
6. Jantra T, et al. Cadmium Distribution and Bioavailability in Cultivated Soil and Crops in the Vicinity of Zinc Mine in Mae Sot. National Research Center for Environmental Management and Hazardous Waste Chulalongkorn University. 2005.
7. Jurairat O. Biological glyphosate degradation of bacteria isolated from farmland soils. Master thesis. Maejo University. Thailand. 2014.
8. Robert D, Perry, Simon S. Cadmium and manganese transport in Staphylococcus aureus membrane vesicles. Journal of Bacteriology. 1982;150:973-976.

9. Quan Z, et. al. The influence of liming on cadmium accumulation in rice grains via iron-reducing bacteria. *Science of the Total Environment*. 2018; 645:109-118.
10. Cooper D. G., Macdonald C. R., Duff S. J. B., Kosaric N. Enhanced Production of Surfactin from *Bacillus subtilis* by Continuous Product Removal and Metal Cation Additions. *Biological Sciences*. 1981;42:408-412.
11. Xiaoyan L, et. al. Characterization of cadmium-resistant bacteria and their potential for reducing accumulation of cadmium in rice grains. *Science of the Total Environment*. 2016;570:97–104.
12. Wuana R. A., Okieimen F. E., Imborvungu J. A. Removal of heavy metals from a contaminated soil using organic chelating acids. *Environ. Sci. Tech.* 2020;7:485-496.
13. Wanpen w, Chanida K. *Methods of Soil Analysis and Interpretation for Soil Survey and Classification: Physical Properties*. Bureau of Science for Land Development. Department of Land Development Ministry of Agriculture and Cooperatives. Thailand. 2016.
14. Office of Land Development Science. *Standard types of agricultural product to Certified by the Land Development Department*. 2013.
15. *Good Aquaculture Practice (GAP)*. Fisheries Product Standard Certification System Development Division, Department of Fisheries, Ministry of Agriculture and Cooperatives. 2018.
16. Yongbing J, Shimeng J, Zhangbao L, Xinpei Y, Zhixiong Q, Renzhi H. Field scale remediation of Cd and Pb contaminated paddy soil using three mulberry (*Morus alba* L.) cultivars. *Ecological Engineering*. 2019; 129:38-44.
17. Land Classification Division and FAO Project Staff. *Soil Interpretation Handbook for Thailand*. Department of Land Development, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Thailand. 1973; 135 p.
18. Ponnampetuma, F.N. *The Chemistry of Submerged Soils*. *Advances in Agronomy*. 1972; 24, 29-96.
19. Soil Survey Division Staff. *Soil Survey Manual*. USDA Handbook No. 18, US Government Printing Office, Washington DC. 1993.
20. Monteiro OAC Jr, Airolid C. Some thermodynamic data on copper-chitin and copper-chitosan biopolymer interactions. *J Colloid Interface Sci.* 1999; 212:212-219.
21. Rieuwerts J S, Mighanetara K, Braungardt C B, Rollinson G K, Pirrie D, Azizi F. Geochemistry and mineralogy of arsenic in mine wastes and stream sediments in a historic metal mining area in the UK. *Science of The Total Environment*. 2014;472:226-234.
22. Sasaki Ch. Experimental study on the influence of percolation patterns on the removal of soluble elements in stratified alluvial-soil paddy fields for rice. 2006; 4 :89-99.
23. Bermond A, Bourgeois S. Influence of Soluble Organic Matter on Cadmium Mobility in Model Compounds and in Soils. *Analyst*, 2015;117:685-687.
24. Laanbroek H. J., Gerards S. Effects of organic manure on nitrification in arable soils. *Biology and Fertility of Soils*. 1991;12:147–153.
25. Seshadri B. et. al. Phosphorus–cadmium interactions in paddy soil. *Geoderma*, 2016;270: 43-59.
26. Meiliang D. et. al. Immobilization of Cadmium by Molecular Sieve and Wollastonite Is Soil pH and Organic Matter Dependent. *Internationnal Journal*

- of Environmental Research and Public Health. 2021;18:1-17.
27. Chuan, M.C., SHU G.Y., LIU J.C. Solubility of heavy metals in a contaminated soil: effects of redox potential and pH. Air and Soil Pollution. 1995;90: 543-556.
28. Xiao Q.H. et. al. Release of cadmium in contaminated paddy soil amended with NPK fertilizer and lime under water management. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018; 159:38-45.
29. Zhi G, Xiang H, Yansong A. Effect of chitosan on the available contents and vertical distribution of Cu^{2+} and Cd^{2+} in different textural soils. Journal of Hazardous Materials. 2009;167:1148–1151.
30. Sara M. A., Abasiyan F. D., Gholam R. M.. Chitosan cross- linked with K- carrageenan to remove cadmium from water and soil systems. Environmental Science and Pollution Research. 2019; 26:26254–26264.