

การประยุกต์ใช้สารชีวภัณฑ์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดินและลดการปนเปื้อน
ของแคดเมียมในนาข้าว



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

กุมภาพันธ์ 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

การประยุกต์ใช้สารชีวภัณฑ์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินและลดการปนเปื้อนของแคดเมียมใน
นาข้าว



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

กุมภาพันธ์ 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

APPLICATION OF BIO-PRODUCT TO IMPROVE SOIL QUALITY AND REDUCE CADMIUM
CONTAMINATION IN PADDY FIELD



WIMONRAT SITISARA

A Dissertation Submitted to University of Phayao
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Doctor of Philosophy Degree in Environmental Technology and Management
February 2022
Copyright 2022 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประยุกต์ใช้สารชีวภัณฑ์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินและลดการปนเปื้อนของแคดเมียมใน
นาข้าว

ของ วิมลรัตน์ ศีตีสาร

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชีระชัย บงการณ)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุขทัย พงศ์พัฒน์ศิริ)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธนกร ชมภูรัตน์)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร. บุญวัฒน์ วิจารย์พล)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร. สุปรีดา หอมกลิ่น)

..... อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ ล้นพา)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณิชภัทร จักรวัฒนา)

..... คณบดีคณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม

(รองศาสตราจารย์ ดร. ตอพงค์ กรีธาชาติ)

- เรื่อง:** การประยุกต์ใช้สารชีวภัณฑ์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดินและลดการปนเปื้อนของแคดเมียมในนาข้าว
- ผู้วิจัย:** วิมลรัตน์ ศีตติสาร, วิทยานิพนธ์: ปร.ด. (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2564
- อาจารย์ที่ปรึกษา:** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุขทัย พงศ์พัฒน์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. ธนกร ชมภูรัตน์ ดร.บุญวัฒน์ วิจารณ์พล ดร.สุปรีดา หอมกลิ่น
- คำสำคัญ:** สารชีวภัณฑ์, แคดเมียม, นาข้าว, จุลินทรีย์

บทคัดย่อ

การประยุกต์ใช้สารชีวภัณฑ์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดินและลดการปนเปื้อนของแคดเมียมในนาข้าว โดยใช้สารชีวภัณฑ์ที่มีการควบคุมการผลิต กำหนดชนิดจุลินทรีย์และความเข้มข้นรวมเท่ากับ 1.0×10^7 เซลล์/กรัม ประกอบด้วย *Achromobacter sp.*, *Azoto bacter sp.*, *Bacillus sp.* และ *Nitrobacter sp.* เพื่อทดลองปลูกข้าวในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ เปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่ไม่มีการปลูกข้าวและปลูกข้าว (ข้าวมะลิ 105) พบว่าการทดลอง MIC500 มีแคดเมียม เท่ากับ 36.45 mg/kg เป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม (ไม่เกิน 37 mg/kg) และมีแคดเมียมในเมล็ดข้าวน้อยที่สุด เท่ากับ 0.19 mg/kg ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) (ไม่เกิน 0.20 mg/kg) ส่วนการทดลองในดินปนเปื้อนแม่ตัว พบว่า MIC500 มีแคดเมียมในดิน เท่ากับ 32.95 mg/kg ลดลง 45.54 % เป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม และมีแคดเมียมในเมล็ดข้าว เท่ากับ 0.15 mg/kg จึงกล่าวได้ว่าสารชีวภัณฑ์สามารถลดการสะสมของแคดเมียมในดินและเมล็ดข้าวได้เมื่อเปรียบเทียบกับ CHEM และ P-T ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) ที่กำหนดไว้ที่ไม่เกิน 0.2 mg/kg

Title: APPLICATION OF BIO-PRODUCT TO IMPROVE SOIL QUALITY AND REDUCE CADMIUM CONTAMINATION IN PADDY FIELD

Author: Wimonrat Sitisara, Dissertation: Environmental Technology and Management, University of Phayao, 2021

Advisor: Sukthai Pongpattanasiri Co-advisor Associate Professor Dr.Thanakorn Chompoorat
Dr.Bunyawat Vichanpol Dr.Supreeda Homklin

Keywords: bio-product, cadmium, paddy fields, microorganisms

ABSTRACT

The application of bioproducts to improve soil quality and reduce contamination of cadmium in paddy fields. Use Bio-product controlled and determine microorganisms type and the total concentration equal to 1.0×10^7 cell/gram was a mixture of the stains of *Achromobacter sp.*, *Azotobacter sp.*, *Bacillus sp.* and *Nitrobacter sp.* . Experimental design, planting rice (Khao Dokmali 105) It was found that in the MIC500 experiment, cadmium was 36.45 mg/kg, Based on the soil quality standard by pollution control Department (not higher than 37 mg/kg) and had the least grain cadmium at 0.19 mg/kg, which was Complies with Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) standards (up to 0.20 mg/kg). As for the experiment in soil contaminated with Mae Tao, it was found that MIC500 contained cadmium in the soil equal to 32.95 mg/kg, a reduction of 45.54%, meeting the soil quality standards for living and agricultural purposes. and cadmium in rice grains was 0.15 mg/kg. Thus, it can be said that the biochemical was able to reduce the accumulation of cadmium in soil and grain when compared to CHEM and PT, which are compliant with the Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) standards.) defined at not more than 0.2 mg/kg

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุขทัย พงศ์พัฒนศิริ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้อุทิศสละเวลาอันมีค่ามาเป็นที่ปรึกษา พร้อมทั้งให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.ชนากร ชมพूर्ตน์ ดร. บุญวัฒน์ วิจารณ์พล และดร.สุปรีดา หอมกลิ่น กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระชัย บงการณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณภัทร จักรวัฒนา และดร.ศิริลักษณ์ สันพา กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) และบริษัทไบโชน จำกัด ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณการวิจัย และสารชีวภัณฑ์ในการทำวิจัย และขอบคุณคณะพนักงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้องที่ช่วยอำนวยความสะดวก จึงทำให้การศึกษาค้นคว้าสำเร็จไปได้ด้วยดี และได้สร้างฐานความรู้ที่มีคุณภาพให้กับผู้ประกอบการสามารถนำไปใช้เพื่อการพัฒนา พร้อมกับการสร้างบุคลากรที่มีทักษะในการทำวิจัยอย่างมีระบบได้อย่างดี สำหรับการทำการวิจัยในครั้งนี้

วิมลรัตน์ ศีตติสาร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
ขอบเขตของการวิจัย	5
นิยามศัพท์เฉพาะ	6
ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย.....	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
สถานการณ์ข่าวในประเทศไทย	7
การใช้วัตถุอันตรายในการเกษตร	11
การปนเปื้อนของสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชในดิน	17
การปนเปื้อนโลหะหนักแคดเมียม (Cadmium) ในดิน	17
กระบวนการบำบัดแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม	19
กระบวนการในการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ	23
การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน	25
แบคทีเรียที่มีความสามารถในการบำบัดมลพิษ.....	25

จุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงโครงสร้าง	26
การทนต่อโลหะหนักของแบคทีเรีย	33
ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักของแบคทีเรีย	38
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	45
การศึกษาความทนทานของจุลินทรีย์ในสารชีวภัณฑ์ต่อความเข้มข้นของแคดเมียม	45
การทดลองสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อน สังเคราะห์	49
การหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ ดาว.....	53
บทที่ 4 ผลการวิจัย	57
การจำแนกชนิดแบคทีเรียโดยวิธี 16s rDNA	62
การทดลองสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อน สังเคราะห์	63
การหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ ดาว.....	88
บทที่ 5 บทสรุป.....	133
สรุปผลการวิจัย	133
อภิปรายผลการวิจัย	136
บรรณานุกรม	142
ภาคผนวก ก มาตรฐานปริมาณแคดเมียมในดินและในข้าว	150
ภาคผนวก ข สมการที่ใช้ในการคำนวณปริมาณแคดเมียมในดิน และในข้าว	156
ภาคผนวก ค ตารางผลการทดลอง.....	158
ภาคผนวก ง ประมวลผลการวิจัย.....	181
ประวัติผู้วิจัย	186

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แสดงเนื้อหาที่เพาะปลูกข้าวนาปี ข้อมูลสำรวจปี 2561	8
ตาราง 2 แสดงเนื้อหาที่เพาะปลูกข้าวนาปรัง ข้อมูลสำรวจปี 2561	8
ตาราง 3 แสดงเนื้อหาที่เพาะปลูกข้าวนาปี ปี 2557-2562	9
ตาราง 4 แสดงเนื้อหาที่เพาะปลูกข้าวนาปรัง ปี 2557-2562	9
ตาราง 5 เปรียบเทียบปริมาณส่งออกข้าวของประเทศผู้ส่งออกที่สำคัญ 5 อันดับ	10
ตาราง 6 ปริมาณส่งออกข้าวไทยรายชนิดข้าวระหว่างปี 2558-2561	11
ตาราง 7 ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าวัตถุดิบอันตรายทางการเกษตร ปี 2551-2561	15
ตาราง 8 ผลกระทบทางสุขภาพของวัตถุดิบอันตรายทางการเกษตร	16
ตาราง 9 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อจำกัดของเทคโนโลยีการฟื้นฟูทางชีวภาพ	22
ตาราง 10 กลุ่มของแบคทีเรียที่มีความสามารถในการย่อยสลายมลพิษในสิ่งแวดล้อม	26
ตาราง 11 รายชื่อจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงโครงสร้างดิน	27
ตาราง 12 แสดงการออกแบบการทดลองหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลด ปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์	51
ตาราง 13 แสดงการออกแบบการทดลองหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลด ปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ดาว	54
ตาราง 14 สมบัติเบื้องต้นของสารชีวภัณฑ์	57
ตาราง 15 การเจริญของจุลินทรีย์ที่ทนต่อแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 300-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าการดูดกลืนแสง OD 600 ระยะเวลา 48 ชั่วโมง	58
ตาราง 16 จำนวนแบคทีเรียที่สามารถเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy Agar (TSA) สารละลายแคดเมียมผสม	59
ตาราง 17 แสดงค่าความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่แบคทีเรียสามารถเจริญได้ (MIC)	61
ตาราง 18 การจำแนกชนิดแบคทีเรียโดยวิธี 16s rDNA	62

ตาราง 19	ข้อมูลสมบัติทางกายภาพของดินก่อนการทดลอง	64
ตาราง 20	ข้อมูลสมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง	64
ตาราง 21	ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียม (Cd) สู่เมล็ดข้าว (Bioaccumulation factor: BAF)	86
ตาราง 22	ข้อมูลความสามารถในการเคลื่อนย้ายของแคดเมียม (Translocation Factor: TF).....	87
ตาราง 23	ข้อมูลสมบัติทางกายภาพของดินก่อนการทดลอง	88
ตาราง 24	ข้อมูลสมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง.....	89
ตาราง 25	ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียม (Cd) สู่เมล็ดข้าว (Bioaccumulation Factor: BAF).....	115
ตาราง 26	ข้อมูลความสามารถในการเคลื่อนย้ายของแคดเมียม (Translocation Factor: TF).....	116
ตาราง 27	แสดงค่ามาตรฐานปริมาณแคดเมียมในดิน	150
ตาราง 28	แสดงค่ามาตรฐานปริมาณแคดเมียมในอาหาร	150
ตาราง 29	มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม	151
ตาราง 30	ข้อมูลปริมาณแคดเมียมในดิน : ไม่ปลูกข้าว	158
ตาราง 31	ข้อมูลปริมาณแคดเมียมในดิน : ปลูกข้าว.....	159
ตาราง 32	ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในรากข้าว	160
ตาราง 33	ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าว	161
ตาราง 34	ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว	162
ตาราง 35	ข้อมูลความสูงของต้นข้าว	163
ตาราง 36	ข้อมูลจำนวนต้น	164
ตาราง 37	ข้อมูลน้ำหนักรากข้าว	165
ตาราง 38	ข้อมูลน้ำหนักต้นข้าว	166
ตาราง 39	ข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest index: HI)	167
ตาราง 40	ข้อมูลผลผลิตของข้าว	168
ตาราง 41	ข้อมูลปริมาณแคดเมียมในดิน : ไม่ปลูกข้าว	169

ตาราง 42	ข้อมูลปริมาณแคดเมียมในดิน : ปลูกข้าว	169
ตาราง 43	ข้อมูลปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน : ไม่ปลูกข้าว	170
ตาราง 44	ข้อมูลปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน : ปลูกข้าว	170
ตาราง 45	ข้อมูลปริมาณไนโตรเจนในดิน : ไม่ปลูกข้าว	171
ตาราง 46	ข้อมูลปริมาณไนโตรเจนในดิน : ปลูกข้าว	171
ตาราง 47	ข้อมูลปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ : ไม่ปลูกข้าว.....	172
ตาราง 48	ข้อมูลปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ : ปลูกข้าว	172
ตาราง 49	ข้อมูลปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ : ไม่ปลูกข้าว.....	173
ตาราง 50	ข้อมูลปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ : ปลูกข้าว.....	173
ตาราง 51	ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในรากข้าว	174
ตาราง 52	ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าว	174
ตาราง 53	ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว.....	175
ตาราง 54	ข้อมูลความสูงของต้นข้าว	175
ตาราง 55	ข้อมูลจำนวนต้น	176
ตาราง 56	ข้อมูลน้ำหนักรากข้าว	176
ตาราง 57	ข้อมูลน้ำหนักต้นข้าว.....	177
ตาราง 58	ข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest index: HI)	177
ตาราง 59	ข้อมูลผลผลิตของข้าว.....	178
ตาราง 60	ความสัมพันธ์การทดลองสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์.....	178
ตาราง 61	ความสัมพันธ์การหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ตัว	180

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 ห่วงโซ่อุตสาหกรรมปศุสัตว์ของประเทศไทย	12
ภาพ 2 ปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีในประเทศ	13
ภาพ 3 การเจริญเติบโตของผลผลิตพืชผลที่สำคัญ	14
ภาพ 4 <i>Bacillus subtilis</i>	28
ภาพ 5 ลักษณะเซลล์ของแบคทีเรีย <i>Azotobacter</i> sp. (A) และ ลักษณะของซีสต์ของ	29
ภาพ 6 <i>Achromobacter</i> sp.	31
ภาพ 7 <i>Nitrobacter</i> sp.	32
ภาพ 8 การทดสอบการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหารเหลวที่มีแคดเมียม	45
ภาพ 9 เทคนิคการ Steak plate	47
ภาพ 10 แสดงการหา Minimal Inhibitory Concentration	48
ภาพ 11 แสดง Drop plate technique	48
ภาพ 12 แสดงการสังเกตความเข้มข้นต่ำสุดของโลหะหนักที่สามารถยับยั้งการเจริญ	49
ภาพ 13 การนับโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic soy agar (TSA)	59
ภาพ 14 คัดเลือกแบคทีเรียจากเชื้อที่เจริญบนอาหาร TSA เลือกโคโลนีเดี่ยวที่มีลักษณะ	60
ภาพ 15 ภาพถ่ายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า	60
ภาพ 16 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่แบคทีเรียสามารถเจริญได้ (MIC)	61
ภาพ 17 ความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่แบคทีเรียไม่สามารถเจริญได้	62
ภาพ 18 ปริมาณแคดเมียมในดิน :ไม่ปลูกข้าว ระยะ Vegetative Phase	66
ภาพ 19 ปริมาณแคดเมียมในดิน :ไม่ปลูกข้าว ระยะ Reproductive Phase	66
ภาพ 20 ปริมาณแคดเมียมในดิน :ไม่ปลูกข้าว ระยะ Ripening Phase	67
ภาพ 21 ปริมาณแคดเมียมในดิน :ปลูกข้าว ระยะ Vegetative Phase	68

ภาพ 22 ปริมาณแคดเมียมในดิน:ปลูกข้าว ระยะ Reproductive Phase	69
ภาพ 23 ปริมาณแคดเมียมในดิน :ปลูกข้าว ระยะ Ripening Phase	69
ภาพ 24 ปริมาณการสะสมของแคดเมียมในรากข้าว	70
ภาพ 25 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าว	71
ภาพ 26 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว: rice hulls	72
ภาพ 27 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว: polished rice	73
ภาพ 28 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว: rice in the husks.....	73
ภาพ 29 ข้อมูลความสูงของต้นข้าว: Vegetative Phase	75
ภาพ 30 ข้อมูลความสูงของต้นข้าว: Reproductive Phase	75
ภาพ 31 ข้อมูลความสูงของต้นข้าว: Ripening Phase	76
ภาพ 32 ข้อมูลจำนวนต้น : Vegetative Phase	77
ภาพ 33 ข้อมูลจำนวนต้น : Reproductive Phase	77
ภาพ 34 ข้อมูลจำนวนต้น : Ripening Phase.....	78
ภาพ 35 ข้อมูลน้ำหนักรากข้าว: Vegetative Phase	79
ภาพ 36 ข้อมูลน้ำหนักรากข้าว: Reproductive Phase	79
ภาพ 37 ข้อมูลน้ำหนักรากข้าว: Ripening Phase.....	80
ภาพ 38 ข้อมูลน้ำหนักต้นข้าว: Vegetative Phase.....	81
ภาพ 39 ข้อมูลน้ำหนักต้นข้าว: Reproductive Phase	81
ภาพ 40 ข้อมูลน้ำหนักต้นข้าว: Ripening Phase	82
ภาพ 41 ข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest index: HI)	83
ภาพ 42 ข้อมูลผลผลิตของข้าว: จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ Number of Full Grain.....	84
ภาพ 43 ข้อมูลผลผลิตของข้าว: น้ำหนักเมล็ด Weight of Grain	84
ภาพ 44 ข้อมูลผลผลิตของข้าว: จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ Grain Blighted.....	85
ภาพ 45 ปริมาณแคดเมียมในดิน : ไม่ปลูกข้าว.....	91

ภาพ 46 ปริมาณแคดเมียมในดิน : ปลูกข้าว	93
ภาพ 47 ปริมาณแคดเมียมในดินที่หายไป	94
ภาพ 48 ข้อมูลปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน : ไม่ปลูกข้าว	95
ภาพ 49 ข้อมูลปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน : ปลูกข้าว	96
ภาพ 50 ข้อมูลปริมาณไนโตรเจนในดิน : ไม่ปลูกข้าว	98
ภาพ 51 ข้อมูลปริมาณไนโตรเจนในดิน : ปลูกข้าว.....	99
ภาพ 52 ข้อมูลปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ : ไม่ปลูกข้าว	100
ภาพ 53 ข้อมูลปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ : ปลูกข้าว	101
ภาพ 54 ข้อมูลปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ : ไม่ปลูกข้าว.....	103
ภาพ 55 ข้อมูลปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ : ปลูกข้าว	104
ภาพ 56 ปริมาณการสะสมของแคดเมียมในข้าว	105
ภาพ 57 ปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเปลือกข้าว (rice hulls)	106
ภาพ 58 ข้าวขัดสีหรือเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออก (Polished rice)	107
ภาพ 59 ข้อมูลความสูงของต้นข้าว.....	108
ภาพ 60 ข้อมูลจำนวนต้น	109
ภาพ 61 ข้อมูลน้ำหนักกรากข้าว.....	110
ภาพ 62 ข้อมูลน้ำหนักต้นข้าว.....	111
ภาพ 63 ข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest index: HI)	112
ภาพ 64 น้ำหนักของเมล็ดข้าว	113
ภาพ 65 จำนวนเมล็ดสมบูรณ์	113
ภาพ 66 จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์	114
ภาพ 67 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินและปริมาณแคดเมียมในราก	120
ภาพ 68 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินและปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว.....	121
ภาพ 69 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินและจำนวนต้นข้าว	121

ภาพ 70 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินและปริมาณแคดเมียมในต้น.....	122
ภาพ 71 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินและปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว	122
ภาพ 72 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินและน้ำหนักราก	123
ภาพ 73 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินและน้ำหนักราก.....	123
ภาพ 74 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินกับปริมาณแคดเมียมในต้นข้าว.....	129
ภาพ 75 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินกับปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว	129
ภาพ 76 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินกับปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว.....	130
ภาพ 77 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินกับปริมาณแคดเมียมในข้าวขาว	130
ภาพ 78 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินกับความสูงต้นข้าว.....	131
ภาพ 79 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินกับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน.....	131
ภาพ 80 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน.....	132
ภาพ 81 การทดสอบความทนของจุลินทรีย์ในสารชีวภัณฑ์ต่อความเข้มข้นของ	181
ภาพ 82 การหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียม	183
ภาพ 83 การหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียม	185



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่ระยะเริ่มเพาะปลูกจนกระทั่งถึงระยะเก็บเกี่ยว การควบคุมโรคพืชมีหลายวิธี แต่เกษตรกรส่วนใหญ่มักเลือกใช้วิธีการควบคุมโรคพืชโดยใช้สารเคมี เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และได้ผลเร็ว ผลจากการใช้สารเคมีโดยไม่ถูกวิธี ส่งผลเสียตามมา ได้แก่ เกิดการื้อยาของเชื้อโรค มีสารตกค้างในผลผลิต และเกิดการปนเปื้อนของสารเคมีในสภาพแวดล้อม เกิดผลเสียโดยตรงทั้งต่อเกษตรกร และผู้บริโภค ที่สำคัญส่งผลต่อการกีดกันทางการค้า ภายใต้เงื่อนไขข้อตกลงขององค์การการค้าโลก (WTO) สินค้าทางการเกษตรที่จะส่งขายยังประเทศคู่ค้าจะต้องมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค

ประกอบกับกระแสนิยมในกลุ่มผู้บริโภคที่ใส่ใจเรื่องสุขภาพ ได้หันมาบริโภคอาหารปลอดสารพิษ อาหารปลอดภัย และผักอินทรีย์ เป็นต้น ทำให้กลุ่มผู้ผลิตที่คิดต่างหันมานิยมในการบริหารจัดการผลิตทางการเกษตรแบบองค์รวม หรือเกษตรอินทรีย์ จึงเป็นกระแสความนิยม ในกลุ่มสังคมสมัยใหม่ ที่ให้ความสำคัญกับการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและระบบนิเวศการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการฟื้นฟูความอุดมสมบูรณ์ของดิน การรักษาแหล่งน้ำให้สะอาด ทั้งนี้เพราะแนวทางเกษตรอินทรีย์อาศัยกลไกและกระบวนการของระบบนิเวศในการทำการผลิต นอกจากการปฏิเสธการใช้สารเคมีในการเกษตรแล้ว ยังให้ความสำคัญกับการสร้างสมดุลของวงจรของธาตุอาหาร พลังงาน อนุรักษ์ระบบนิเวศการเกษตร การฟื้นฟูความหลากหลายทางชีวภาพดังนั้นเกษตรกรที่หันมาทางเกษตรอินทรีย์ที่ให้ความสำคัญกับอนุรักษ์ระบบนิเวศการเกษตร

เช่นเดียวกับสถานการณ์เกษตรอินทรีย์กำลังมีความต้องการสูงมากในต่างประเทศ และเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง ห้างสรรพสินค้าชั้นนำหลายแห่งได้เลือกผักอินทรีย์เพื่อวางจำหน่าย นอกจากนี้ยังทำให้ภาพรวมในภาคการเกษตรของประชาคมโลกขยายตัวมากขึ้น สังเกตจากปี 2555 มีพื้นที่การเพาะปลูกเกษตรอินทรีย์รวมทั้งสิ้น 234.3 ล้านไร่ เยอะที่สุดอยู่ใน ออสเตรเลีย อาร์เจนตินา อเมริกา ส่วนในประเทศไทย สัดส่วนของเกษตรอินทรีย์มีน้อยมากไม่ถึง 1% ของภาคการเกษตรทั้งหมด (กรมวิชาการเกษตร, 2557) ซึ่งกระทรวงพาณิชย์เปิดเผยว่าตั้งแต่ปี 2549 ดัชนีการขยายตัวเริ่มมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเรื่อย ๆ จาก 3.83% เป็น 10.79 % ในปี 2553 ในปี 2557 นี้คาดการณ์ว่าจะมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นถึง 13.91% ซึ่งคาดการณ์ว่าจะมีทิศทางการที่ดีขึ้น

แต่อย่างไรก็ตามการจะได้รับการรับรองเป็นผลิตภัณฑ์จากเกษตรอินทรีย์นั้น เกษตรกรโดยส่วนใหญ่ขาดความรู้ความเข้าใจ ในมาตรฐานการผลิตที่ถูกต้อง อีกทั้งในฐานะข้อมูลเกษตรอินทรีย์ของไทยยังขาดเทคโนโลยีและรูปแบบการผลิตที่เหมาะสมกับภูมิสังคมของประเทศไทยอีกด้วย จึงทำให้การขยายตัวของระบบเกษตรอินทรีย์ของประเทศไทยมีการขยายตัวช้ามาก นอกจากนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับข้อกำหนดและกฎระเบียบที่เกษตรกรต้องปฏิบัติตามมาตรฐานเกษตรอินทรีย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องระยะเวลาในการปรับเปลี่ยนซึ่งในกรณีที่เป็นผลิตพืชที่ส่งออกไปยังสหภาพยุโรป กำหนดระยะเวลาปรับเปลี่ยนตามมาตรฐานการผลิตพืช ของสหภาพยุโรปดังนี้ พืชล้มลุกมีระยะปรับเปลี่ยน 24 เดือน และพืชยืนต้นมีระยะปรับเปลี่ยน 36 เดือน ในกรณีที่มีการใช้ปัจจัยการผลิตต้องห้ามในพื้นที่ฟาร์มมาก่อนสมัครขอรับรองกับ มกท.ผลผลิตที่จะสามารถขายเป็นผลผลิตเกษตรอินทรีย์ได้ จะต้องเป็นผลผลิตที่เก็บเกี่ยวหลังจาก 36 เดือนนับแต่มีการใช้ปัจจัยการผลิตต้องห้ามเป็นครั้งสุดท้าย (มาตรฐานเกษตรอินทรีย์ มกท. ฉบับปรับปรุง กุมภาพันธ์ 2560) นอกจากนี้การขาดความรู้ความเข้าใจ ในมาตรฐานเกษตรอินทรีย์ และเกษตรอินทรีย์ยังขาดเทคโนโลยีและรูปแบบการผลิตที่เหมาะสม จึงทำให้ผลผลิตทางการเกษตรที่ต้องการมีจำนวนน้อย หรือไม่ได้คุณภาพ อีกทั้งให้ผลที่ช้ากว่าการใช้สารเคมี จึงมีเกษตรกรหลายรายที่เปลี่ยนใจ และล้มเลิกการทำเกษตรอินทรีย์ ด้วยเงื่อนไขของภาครัฐที่กำหนดมาตรฐานในการรับรองเกษตรอินทรีย์ที่ว่า การเปลี่ยนรูปแบบการเกษตรจากเกษตรเคมีมาเป็นเกษตรอินทรีย์นั้นในขั้นตอนการขึ้นทะเบียนเพื่อรับรองคุณภาพผลิตภัณฑ์ในการเป็นเกษตรอินทรีย์นั้น พื้นที่ดังกล่าวต้องปลอดจากการใช้สารเคมีเป็นระยะเวลาถึง 3 ปี และกว่าเกษตรกรจะได้รับการรับรองก็กินเวลานานถึง 4 ปี ทำให้เกษตรกรขาดโอกาส ขาดรายได้เป็นจำนวนมากในช่วงเว้นระยะดังกล่าว

และต้องตรวจไม่พบการปนเปื้อนของสารกำจัดศัตรูพืช และโลหะหนัก ซึ่งสาเหตุของการปนเปื้อนมาจากการใช้สารเคมีในพื้นที่การเกษตรทำให้เกิดการตกค้างของโลหะหนัก โดยเฉพาะการปนเปื้อนของแคดเมียมในดิน และผลผลิตทางการเกษตร (Xiaoyan Lin et al., 2016) แคดเมียมจะปนเปื้อนมากับการใช้ปุ๋ยฟอสเฟต สารกำจัดศัตรูพืช ยากำจัดวัชพืช ดังเช่นในโครงสร้างโมเลกุลของไกลโฟเซต ประกอบด้วย หมู่คาร์บอกซิล หมู่อะมิโน และหมู่ฟอสเฟตด้วยโครงสร้างโมเลกุลนี้ทำให้ไกลโฟเซตจับกับโลหะหนัก เกิดการสะสมของโลหะหนักในดินเมื่อมีการใช้เป็นเวลานาน หรือปริมาณมากจึงเป็นสาเหตุสำคัญของการปนเปื้อนแคดเมียมในดินพื้นที่ การเกษตร (Channa Jayasumana Sarath Gunatilake and Priyantha Senanayake, 2014) นอกจากนี้การปนเปื้อนของแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อมยังมาจากอุตสาหกรรมเคมี เหมืองแร่ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า ปีโตรเลียม เป็นต้น (Abdus-Salam,N.,Bello, M.,2015) ประกอบกับการย่อยสลายทางธรรมชาติของแคดเมียมมีครึ่งชีวิตที่ยาวนาน 15-30 ปี จึงตกค้างอยู่ใน

สิ่งแวดลอมได้เป็นเวลานาน และมีความเป็นพิษสูงส่งผลกระทบต่อพืช สัตว์ มนุษย์ จาก รายงานการวิจัยพบความเข้มข้นของแคดเมียม 0.001–0.1 mg/L สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อ จุลินทรีย์ได้ (Baba H et al., 2013) เมื่อแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจะจับกับเม็ดเลือด และ albumin ถ้ามีความเข้มข้นสูงถึง 200 µg จะส่งผลให้เซลล์ท่อไตไม่สามารถดูดซึมกลับโปรตีนที่มีน้ำหนัก โมเลกุลต่ำ เช่น β_2 microglobulin ได้ นอกจากแคดเมียมจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโรคไตได้โดย ไต แล้ว ยังถูกจัดให้เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์อีกด้วย (Office of Occupational and Environmental Diseases, 2014)

ในพื้นที่เพาะปลูกข้าวแคดเมียมในดินจะอยู่ในรูปของ Cd^{2+} โดยเคลื่อนที่ผ่านทางราก ไปตามส่วนต่าง ๆ และสะสมในเมล็ดข้าว (Quan Zhang et al., 2018) ข้อมูลการศึกษาใน ประเทศไทยพบมีการสะสมของแคดเมียมบริเวณลุ่มน้ำแม่ตาบ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก แบ่งเป็นปริมาณการสะสมของแคดเมียมในดินมีค่าระหว่าง 0.5–284 mg/kg และปริมาณการ สะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าวมีค่าระหว่าง 0.04–1.75 mg/kg (Anongnat Sriprachote et al., 2012) 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) (วนิดา โนบรรเทา และคณะ, มปป.) จากข้อมูลการส่งออกข้าวไทยในรายงานสรุปล สถานการณ์ส่งออกข้าวไทย การส่งออกข้าวในช่วงเดือนมกราคม–กุมภาพันธ์ 2562 มีปริมาณรวม 1,639,260 ตัน มูลค่า 26,980.3 ล้านบาท (842.7 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ) และเป็นผลผลิตทาง การเกษตรที่ไทยส่งออกมากที่สุดเป็นอันดับ 1 ทั้งนี้การส่งออกสินค้าปัจจุบันให้ความสำคัญถึง คุณภาพและมาตรฐานการส่งออกเป็นสำคัญ หากสินค้ามีการปนเปื้อนจากโลหะหนัก ยาฆ่าแมลง และอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ อาจกระทบต่อปริมาณการส่งออกและความน่าเชื่อถือ ของสินค้าเกษตรไทย

จึงได้มีการศึกษาวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ ที่จะนำจุลินทรีย์ (จุลินทรีย์ ปฏิปักษ์ antagonist) ในธรรมชาติมาควบคุมเชื้อโรคพืช และในปัจจุบันก็เป็นที่ยอมรับว่าเป็นวิธี ที่มีโอกาสสูงในการนำไปเป็นกลยุทธ์ป้องกันกำจัดโรคพืช ตัวอย่างเช่นการพัฒนาและนำไปใช้ อย่างได้ผลดีรวมทั้งสามารถพัฒนาเป็นการค้าได้หลายชนิด เช่น การใช้เชื้อ *Agrobacterium radiobacter* K84 ไปควบคุมโรคปุ่มปมของพืชที่เกิดจากเชื้อ *A. tumefaciens* และการศึกษา ของจุไรรัตน์ อิมินา (2557) ด้านการย่อยสลายสารไกลโฟเสททางชีวภาพของแบคทีเรียที่แยก ได้จากดินในพื้นที่เพาะปลูก พบแบคทีเรียในกลุ่ม Bacillus เป็นกลุ่มที่ต้องการออกซิเจนในการ เจริญเติบโต (aerobic bacteria) สามารถเจริญได้ดีที่อุณหภูมิต่ำจนถึงอุณหภูมิสูงและเจริญได้ดี

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการศึกษาประสิทธิภาพของสารชีวภัณฑ์ (น้ำหมักชีวภาพ) ในการปรับปรุงคุณภาพดินและลดการปนเปื้อนของแคดเมียมในนาข้าวในพื้นที่เกษตรเคมีสู่การปรับเปลี่ยนเป็นพื้นที่เกษตรอินทรีย์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความทนทานของจุลินทรีย์ในสารชีวภัณฑ์ต่อความเข้มข้นของแคดเมียม
2. เพื่อหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์
3. เพื่อหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ในการลดการสะสมของแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ดาว

ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตเนื้อหา

1. สารชีวภัณฑ์ ที่ใช้ในการทดลองเป็นสารชีวภัณฑ์จากบริษัทไบรง จำกัด ที่ประกอบด้วย จุลินทรีย์ *Achormobacter* sp., *Azoto bacter* sp., *Bacillus* sp. และ *Nitrobactor* sp. โดยมีความเข้มข้นของจุลินทรีย์ เท่ากับ 1.0×10^7 cell/gram ซึ่งมีการควบคุมการผลิตที่ได้มาตรฐาน
2. ดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดิน ในพื้นที่ปลูกข้าว บ้านไร่ ตำบลแม่ตาเรือ อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา และดินในพื้นที่ปลูกข้าว บ้านแม่ดาวใหม่ ตำบลแม่ดาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก
3. พีชที่ใช้ในการทดลอง คือ ข้าวขาวมะลิ 105

ขอบเขตสถานที่

1. ออกแบบการทดลองในกระถางและทำการทดลองในโรงเรือน คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา
2. วิเคราะห์ข้อมูลสมบัติทางเคมีของดิน ปริมาณแคดเมียมในดินและข้าว ภายในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา

ขอบเขตเวลา

ระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาวิจัยตั้งแต่เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2563

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. สารชีวภัณฑ์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์หรือส่วนใดส่วนหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์และกระบวนการผลิตสิ่งที่ได้และเกิดจากสิ่งมีชีวิต
2. เกษตรอินทรีย์ หมายถึง พืช ผล และสัตว์ ทางเกษตร ที่คำนึงสภาพแวดล้อมโดยหลีกเลี่ยงการใช้สารสังเคราะห์ไม่ว่าจะเป็นปุ๋ยเคมีการกำจัดศัตรูพืชและฮอร์โมนต่าง ๆ ตลอดจนไม่ใช้พืชหรือสัตว์ที่เกิดจากตัดต่อพันธุกรรม ที่อาจจะก่อให้เกิดมลพิษในสิ่งแวดล้อม
3. มลพิษดิน หมายถึง ดินที่เสื่อมค่าไป จากเดิม และหรือมีสารมลพิษเกินขีดจำกัดจนเป็นอันตรายต่อสุขภาพ และพลาณามัย ตลอดจน การเจริญเติบโตของพืช และสัตว์ ทั้งโดยทางตรงและทางอ้อม
4. การฟื้นฟูดิน หมายถึง การปรับปรุงบำรุงดิน รวมถึงการแก้ไขคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและเคมีของดินให้มีความสามารถในการให้ผลผลิตพืชที่ดีขึ้น
5. แคดเมียม หมายถึง โลหะหนักที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลกระทบต่อพืช สัตว์ เกิดการสะสมได้ทั้งในดิน น้ำ พืช และส่งผ่านไปยังห่วงโซ่อาหาร

ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

1. สามารถนำข้อมูลอัตราส่วนที่เหมาะสมของการใช้สารชีวภัณฑ์ไปสร้างเป็นแบบแผนในการประยุกต์ใช้ในพื้นที่เกษตรอินทรีย์
2. สามารถทราบถึงแนวทางและความเป็นไปได้ในการลดระยะในการขอรับรองมาตรฐานเกษตรอินทรีย์ต่อไป
3. สามารถเป็นข้อมูลสนับสนุนการลดหรือป้องกันการปนเปื้อนโลหะหนัก (แคดเมียม) ของดินในพื้นที่ขอรับรองมาตรฐานเกษตรอินทรีย์ต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัย การประยุกต์ใช้สารชีวภัณฑ์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดินและลดการปนเปื้อนของแคดเมียมในนาข้าว ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยต่าง ๆ ดังนี้

1. สถานการณ์ข้าวในประเทศไทย
2. การใช้วัตถุอันตรายในการเกษตร
3. การปนเปื้อนของสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชในดิน
4. การปนเปื้อนโลหะหนักแคดเมียม (Cadmium) ในดิน
5. กระบวนการบำบัดแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม
6. กระบวนการในการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ
7. การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน
8. แบคทีเรียที่มีความสามารถในการบำบัดมลพิษ
9. จุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงโครงสร้าง
10. การทนต่อโลหะหนักของแบคทีเรีย
11. ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักของแบคทีเรีย
12. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สถานการณ์ข้าวในประเทศไทย

ข้อมูลรายงานพื้นที่เพาะปลูกของประเทศไทยในปี 2561 มีพื้นที่ทั้งหมด 72,047,711 ไร่ คิดเป็นผลผลิตทั้งหมดเป็น 33,142,410 ตัน พื้นที่ดังกล่าวแบ่งเป็นพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปี และข้าวนาปรัง ดังรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (Office of Agricultural Economics) พบว่าประเทศไทยมีเนื้อที่เพาะปลูกข้าวนาปีทั้งหมด 59,980,731 ไร่ คิดเป็นผลผลิต 25,177,856 ตัน โดยภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปีมากที่สุด 36,878,181 ไร่ มีผลผลิต 11,706,257 ตัน ภาคใต้มีพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปีน้อยที่สุด 780,513 ไร่ มีผลผลิต 373,598 ตัน ดังตาราง 1 แสดงเนื้อที่เพาะปลูกข้าวนาปี ข้อมูลสำรวจปี 2561

ส่วนพื้นที่ในการปลูกข้าวนาปรังของประเทศไทยนั้นมีพื้นที่ทั้งหมด 12,066,980 ไร่ คิดเป็นผลผลิต 7,964,554 ตัน ภาคกลางมีพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปรังมากที่สุด 5,311,948 ไร่

มีผลผลิต 3,717,454 ตัน ภาคใต้มีพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปรังน้อยที่สุด 169,151 ไร่ มีผลผลิต 90,958 ตัน ดังรายละเอียดในตารางแสดงเนื้อที่เพาะปลูกข้าวนาปรัง ข้อมูลสำรวจปี 2561

ตาราง 1 แสดงเนื้อที่เพาะปลูกข้าวนาปี ข้อมูลสำรวจปี 2561

พื้นที่	เนื้อที่เพาะปลูก	เนื้อที่เก็บเกี่ยว	ผลผลิต (ตัน)	ผลผลิตต่อไร่	
	(ไร่)	(ไร่)		ปลูก	เก็บ
รวมทั้งประเทศ	59,980,731	55,627,198	25,177,856	420	453
ภาคเหนือ	13,814,978	13,597,349	7,847,727	568	577
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	36,878,181	32,869,030	11,706,257	317	356
ภาคกลาง	8,507,059	8,382,239	5,250,274	617	626
ภาคใต้	780,513	778,580	373,598	479	480

ที่มา: ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, พ.ศ.2561

ตาราง 2 แสดงเนื้อที่เพาะปลูกข้าวนาปรัง ข้อมูลสำรวจปี 2561

พื้นที่	เนื้อที่เพาะปลูก	เนื้อที่เก็บเกี่ยว	ผลผลิต (ตัน)	ผลผลิตต่อไร่	
	(ไร่)	(ไร่)		ปลูก	เก็บ
รวมทั้งประเทศ	12,066,980	12,035,344	7,964,554	660	662
ภาคเหนือ	4,819,308	4,807,364	3,139,976	652	653
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	1,766,573	1,757,522	1,016,166	575	578
ภาคกลาง	5,311,948	5,302,398	3,717,454	700	701
ภาคใต้	169,151	168,060	90,958	538	541

ที่มา: ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, พ.ศ.2561

เช่นเดียวกับข้อมูลเนื้อที่เพาะปลูกข้าวนาปีและข้าวนาปรังปี 2557-2562 โดยสมาคมผู้ส่งออกข้าวไทยและคณะกรรมการพัฒนาคุณภาพข้อมูลด้านการเกษตร พบว่าในพื้นที่เพาะปลูก และผลผลิตของข้าวนาปี และข้าวนาปรังมี ปี 2562 มีปริมาณลดลงจากปี 2557

โดยผลผลิตต่อพื้นที่เพาะปลูกของข้าวนาปีน้อยกว่าข้าวนาปรัง รายละเอียดดังตารางแสดง
เนื้อที่เพาะปลูกข้าวนาปีและข้าวนาปรัง ปี 2557-2562

ตาราง 3 แสดงเนื้อที่เพาะปลูกข้าวนาปี ปี 2557-2562

รายการ	2557	2558	2559	2560	2561	2562
เนื้อที่ปลูก (ล้านไร่)	62.08	58.06	58.65	59.22	59.21	59.30
เนื้อที่เก็บเกี่ยว(ล้านไร่)		55.10	56.55	54.96	53.36	56.82
ผลผลิต(ล้านตัน)	27.09	24.31	25.24	24.93	24.22	25.80
ผลผลิตต่อพื้นที่ เพาะปลูก (ก.ก./ไร่)		419	430	421	409	435
ผลผลิตต่อพื้นที่เก็บ เกี่ยว (ก.ก./ไร่)	436	441	446	454	454	454

ที่มา: สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย และคณะกรรมการพัฒนาคุณภาพข้อมูลด้านการเกษตร, พ.ศ.2562

ตาราง 4 แสดงเนื้อที่เพาะปลูกข้าวนาปรัง ปี 2557-2562

รายการ	2557	2558	2559	2560	2561	2562
เนื้อที่ปลูก (ล้านไร่)	15.05	8.46	5.14	10.46	12.07	11.68
เนื้อที่เก็บเกี่ยว(ล้านไร่)			5.08	10.40	12.04	11.63
ผลผลิต(ล้านตัน)	9.67	5.35	3.11	6.62	7.96	7.75
ผลผลิตต่อพื้นที่ เพาะปลูก (ก.ก./ไร่)			605	633	660	664
ผลผลิตต่อพื้นที่เก็บ เกี่ยว (ก.ก./ไร่)	642	632	612	636	662	667

ที่มา: สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย และคณะกรรมการพัฒนาคุณภาพข้อมูลด้านการเกษตร, พ.ศ.2562

เนื่องจากข้อมูลรายงานพื้นที่เพาะปลูกของประเทศไทยในปี 2561 มีพื้นที่ทั้งหมด 72,047,711 ไร่ คิดเป็นผลผลิตทั้งหมดเป็น 33,142,410 ตัน เนื่องจากพื้นที่เพาะปลูกข้าวดังกล่าวประกอบด้วยความต้องการบริโภคข้าวจากอารยประเทศมากมาย เนื่องจากข้าวเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับมื้ออาหาร บางประเทศไม่ค่อยมีพื้นที่ทำการเกษตร และบาง

ประเทศเช่น ประเทศจีน ที่มีประชากรมากทำให้ข้าวไม่เพียงพอต่อการบริโภคของประชากรในประเทศ (สินค้าเกษตรส่งออก <https://www.freightexpress.co.th>, 2561) จึงเป็นเหตุผลที่ข้าวได้รับการส่งออกจำนวนมาก โดยเป็นสินค้าการเกษตรที่มีการส่งออก ไปยังตลาดอาเซียนสูงเป็นอันดับ 5 ของไทย มีมูลค่าส่งออก 20,128 ล้านบาท รองจากน้ำตาลและผลิตภัณฑ์จากน้ำตาล มีมูลค่าส่งออก 60,350 ล้านบาท เครื่องดื่ม มีมูลค่าส่งออก 46,900 ล้านบาท ผลไม้ (ลำไย ทูเรียน และมังคุด) มีมูลค่าส่งออก 40,948 ล้านบาท และยางพาราธรรมชาติ มีมูลค่าส่งออก 32,398 ล้านบาท (ศูนย์ข้อมูลข่าวสารอาเซียน กรมประชาสัมพันธ์, 2561) ดังรายงานสถานการณ์การส่งออกข้าวแนวโน้มและทิศทางการส่งออกข้าวไทย ปี 2562 โดยสมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย (Thai Rice Exporters Association) พบว่าประเทศไทยมีการส่งออกข้าวในปี 2559–2561 เป็นอันดับ 2 รองจากอินเดีย จำนวน 0.378 ล้านตันข้าวสาร ส่วนอินเดีย ส่งออก 0.350 ล้านตันข้าวสาร รายละเอียดดังตาราง เปรียบเทียบปริมาณส่งออกข้าวของประเทศผู้ส่งออกที่สำคัญ 5 อันดับ ซึ่งประเทศไทยส่งออกผลิตภัณฑ์ข้าวในรูปของต้นข้าวขาวมากที่สุด 5,493,422 ตัน ในปี 2561 รองลงมาคือ ข้าวเหนียว 2,708,477 ตัน ต้นข้าวขาวมะลิ 1,274,943 ตัน และน้อยที่สุด คือ ต้นข้าวเหนียว 180,159 ตัน รายละเอียดดังตาราง ปริมาณส่งออกข้าวไทยรายชนิดข้าวระหว่างปี 2558–2561

ตาราง 5 เปรียบเทียบปริมาณส่งออกข้าวของประเทศผู้ส่งออกที่สำคัญ 5 อันดับ

ประเทศ	2559	2560	2561	2561	2562
	1–15 มกราคม				
ไทย	9.91	11.67	11.09	0.45	0.38
อินเดีย	10.04	12.12	11.97	0.47	0.35
เวียดนาม	4.86	6.60	6.97	0.19	0.13
ปากีสถาน	3.96	3.21	3.18	0.19	0.20
สหรัฐ	3.53	3.37	2.79	0.10	0.00

หมายเหตุ: หน่วย : ล้านตันข้าวสาร

ที่มา: สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย (Thai Rice Exporters Association), พ.ศ.2562

ตาราง 6 ปริมาณส่งออกข้าวไทยรายชนิดข้าวระหว่างปี 2558-2561

ชนิดข้าว	2558	2559	2560	2561
ต้นข้าวขาว	4,787,696	4,576,990	4,680,396	5,493,422
ปลายข้าวขาว	206,691	242,951	401,988	399,061
ต้นข้าวขาวมะลิ	1,405,761	1,561,539	1,635,702	1,274,943
ปลายข้าวขาวมะลิ	581,471	804,646	673,702	382,473
ต้นข้าวหอมไทย	124,401	131,694	216,030	256,133
ปลายข้าวหอมไทย	25	33	169,537	188,429
ข้าวหนึ่ง	2,316,900	2,149,597	3,380,167	2,708,477
ต้นข้าวเหนียว	124,191	164,839	213,718	180,159
ปลายข้าวเหนียว	248,644	274,104	303,707	205,590
ปริมาณรวม (ตัน)	9,795,781	9,906,393	11,674,331	11,088,739
มูลค่า (ล้านบาท)	155,912	154,691	175,161	180,270
ราคาต่อหน่วย (บาท/ตัน)	15,916	15,615	15,004	16,257

หมายเหตุ: หน่วย : ตันข้าวสาร

ที่มา: สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย (Thai Rice Exporters Association), พ.ศ.2562

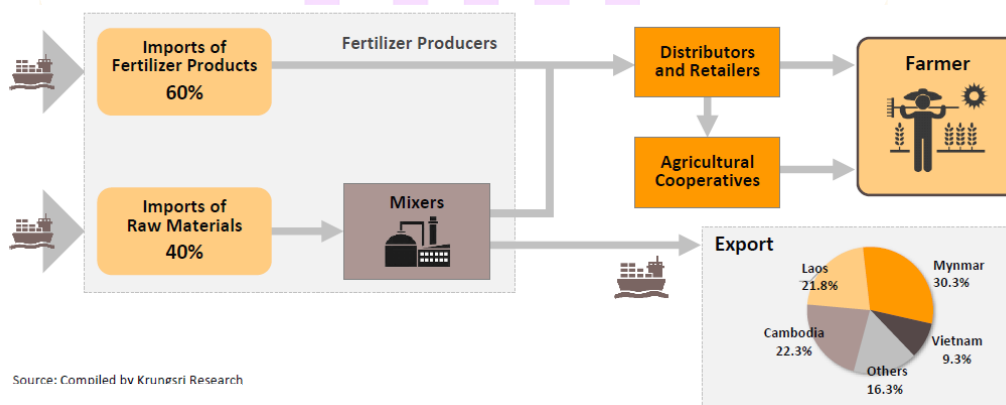
การใช้วัตถุดิบในการเกษตร

ข้อมูลจากแนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2561-2563 เรื่องอุตสาหกรรมปุ๋ยโดยวิจัยกรุงศรี นำโดย ดร. สมประวิณ มันประเสริฐ พบว่าการนำเข้าปุ๋ยเคมีของไทย ส่วนใหญ่เป็นการนำเข้าแม่ปุ๋ย (สัดส่วน 62.5% ของปริมาณนำเข้าปุ๋ยเคมีทั้งหมด) ประกอบด้วยปุ๋ยไนโตรเจน สัดส่วน 47.8% (นำเข้าจากซาอุดีอาระเบีย กาตาร์ มาเลเซีย และจีน) ปุ๋ยโพแทสเซียม สัดส่วน 14.5% (นำเข้าจากแคนาดา เบลารุส เยอรมนี ชิลี และอิสราเอล) ปุ๋ยฟอสฟอรัส สัดส่วน 0.2% (นำเข้าจากอียิปต์ ออสเตรเลีย มาเลเซีย และจีน) และที่เหลือ 37.5% เป็นการนำเข้าปุ๋ยผสม (Compound NPK) มาแบ่งบรรจุโดยมีแหล่งนำเข้าสำคัญ คือ จีน รัสเซีย เกาหลีใต้ นอร์เวย์ และฟินแลนด์ เป็นต้น ส่วนการผลิตแม่ปุ๋ยเคมีทำได้เพียงบางประเภทและมีการผลิตต่ำเพียง 5.8 แสนตัน/ปี โดยแม่ปุ๋ยที่ไทยผลิตได้ อาทิ แอมโมเนีย แอมโมเนียมซัลเฟต เป็นต้น

ปุ๋ยเคมีที่ใช้กันมากในภาคเกษตรกรรมของไทยได้แก่ ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0), ปุ๋ยแอมโมเนีย ซัลเฟต (21-0-0), ปุ๋ยสูตร 16-20-0, 15-15-15, 16-16-8, และ 13-13-21 ซึ่งปริมาณ

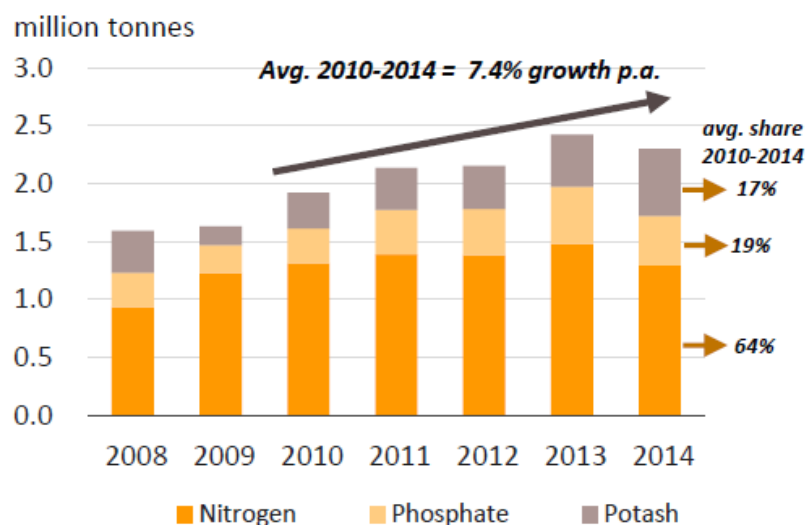
การใช้ปุ๋ยเคมีทั้ง 6 ชนิดดังกล่าวรวมกันคิดเป็นสัดส่วนกว่า 90% ของปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีรวมทั้งประเทศ เนื่องจากใช้ได้กับพืชทุกชนิดทั้งนาข้าว พืชไร่ ไม้ผล รวมทั้งพืชผักชนิดต่าง ๆ เพื่อเร่งการเจริญเติบโตทุกส่วนของพืช โดยปุ๋ยที่ผลิตและจำหน่ายจะต้องได้รับการขึ้นทะเบียนถูกต้องกับกรมวิชาการเกษตร ตามพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2518 และพระราชบัญญัติปุ๋ยฉบับที่ 2 พ.ศ. 2550

ความต้องการใช้ปุ๋ยเคมีในประเทศเฉลี่ยประมาณปี ละ 5-6 ล้านตัน ซึ่งหากจำแนกการใช้ปุ๋ยเคมีตามข้อมูลของ IFA ในปี 2553-2557 การใช้ปุ๋ยประเภทไนโตรเจน (N: สัดส่วน 64%), ฟอสฟอรัส (P: สัดส่วน 19%), และโพแทสเซียม (K: สัดส่วน 17%) มีอัตราการเติบโต รวมกันเฉลี่ยที่ 7.4% ต่อปี เนื่องจากปุ๋ยไนโตรเจนหรือปุ๋ยยูเรียเป็นปุ๋ยเคมีมาตรฐาน ที่เกษตรกรใช้ในช่วงแรกของการเพาะปลูกที่ต้องเร่งการเจริญเติบโต โดยพืชเศรษฐกิจที่มี ปริมาณการใช้ปุ๋ยมากที่สุด ได้แก่ ข้าว คิดเป็น 42% ของปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีทั้งหมด (แบ่งเป็นข้าวนาปี 30% และข้าวนาปรัง 12%) ซึ่งเป็นไปตามสัดส่วนพื้นที่เพาะปลูก พืชของไทยที่มีพื้นที่ปลูกข้าวทั่วประเทศสูงกว่า 80 ล้านไร่ รองลงมา ได้แก่ ยางพารา (22%), อ้อยโรงงาน (10%), ปาล์มน้ำมัน (9%), มันสำปะหลัง (5%), ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (5%) และพืชอื่น ๆ (7%) แต่หากพิจารณาอัตราการใช้ปุ๋ยต่อไร่แล้ว ปาล์มน้ำมันและข้าวนาปรังจะมี อัตราการใช้ปุ๋ยเคมีมากที่สุด รองลงมา ได้แก่ อ้อย ยางพารา และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ตามลำดับ ดังนั้น ทิศทางการขยายพื้นที่เพาะปลูกในกลุ่มพืชเศรษฐกิจต่าง ๆ เหล่านี้ จะทำให้ความต้องการใช้ปุ๋ยเคมีเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



ภาพ 1 ห่วงโซ่อุตสาหกรรมปุ๋ยของประเทศไทย

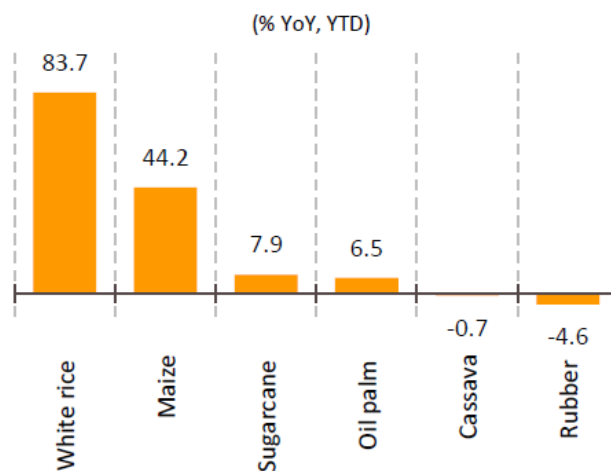
ที่มา: <https://www.krungsri.com> > bank > getmedia > IO_Fertilizer_2017_TH, พ.ศ.2562



ภาพ 2 ปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีในประเทศ

ที่มา: <https://www.krungsri.com> > bank > getmedia > IO_Fertilizer_2017_TH, พ.ศ.2562

ในช่วงครึ่งแรกของปี 2560 ความต้องการใช้ปุ๋ยเคมีเพื่อการเกษตรเพิ่มขึ้นในพืชเศรษฐกิจสำคัญ โดยเฉพาะข้าวนาปรังที่เริ่มปลูกในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2559 (นาปรังรอบแรก) จนถึงเดือนมีนาคม (นาปรังรอบสอง) ปัจจัยหนุนจากปริมาณน้ำในเขื่อนเพื่อการเกษตรในปี 2559/2560 ที่เพิ่มขึ้นเกือบเท่าตัวเมื่อเทียบกับปีก่อนหน้า ทำให้ภาครัฐสามารถจัดสรรน้ำให้กับภาคการเกษตรได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกษตรกรสามารถขยายเนื้อที่เพาะปลูกเพิ่ม โดยครึ่งแรกของปีผลผลิตพืชเศรษฐกิจที่เพิ่มขึ้น ได้แก่ ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ อ้อย และปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นพืชที่มีอัตราการใช้ปุ๋ยเคมีต่อไร่สูง



ภาพ 3 การเจริญเติบโตของผลผลิตพืชผลที่สำคัญ

ที่มา: <https://www.krungsri.com> > bank > getmedia > IO_Fertilizer_2017_TH, พ.ศ.2562

จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กรมวิชาการเกษตร พบปัจจัยการผลิตประเภทวัตถุดิบทางการเกษตรในปี 2551-2561 พบว่าประเทศไทยมีการนำเข้าวัตถุดิบทางการเกษตร ได้แก่ สารกำจัดวัชพืช สารกำจัดแมลง สารป้องกันและกำจัดโรคพืช โดยสารกำจัดวัชพืชมีปริมาณการนำเข้ามากกว่าชนิดอื่น จากปริมาณการนำเข้าในปี 2551 มีปริมาณการนำเข้า 68,825 ตัน คิดเป็น 11,487 ล้านบาทมีการนำเข้าเพิ่มขึ้นทุกปีอย่างต่อเนื่องและมากที่สุดในปี 2560 ปริมาณการนำเข้าเท่ากับ 148,979 ตัน มูลค่า 13,686 ล้านบาท ในขณะที่สารกำจัดแมลง สารป้องกันและกำจัดโรคพืช มีปริมาณการนำเข้าอยู่ในช่วง 10,000 -20,000 ตัน มูลค่า 2,500-7,000 ล้านบาท เมื่อพิจารณาสัดส่วนการนำเข้าปี 2561 พบว่าสารกำจัดวัชพืชมีสัดส่วนสูงสุดร้อยละ 73 สารป้องกันและกำจัดโรคพืช ร้อยละ 12 สารกำจัดแมลงร้อยละ 11 และสารอื่น ๆ ร้อยละ 4 ดังตารางปริมาณและมูลค่าการนำเข้าวัตถุดิบทางการเกษตร ปี 2551-2561

ตาราง 7 ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าวัตถุอันตรายทางการเกษตร ปี 2551-2561

ปี	สารกำจัดวัชพืช		สารกำจัดแมลง		สารป้องกันและกำจัดโรคพืช		อื่นๆ		รวม	
	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า
2551	68,825	11,487	25,332	4,557	11,255	2,537	4,497	580	109,908	19,182
2552	97,954	9,338	24,680	3,972	10,367	2,968	4,590	537	137,594	16,816
2553	80,278	8,845	23,417	4,670	9,671	3,860	4,332	550	117,698	17,924
2554	112,177	11,480	34,672	5,938	12,179	3,875	5,355	751	164,383	22,044
2555	106,860	11,294	16,797	3,686	6,972	3,883	3,748	494	134,377	19,357
2556	137,049	14,873	21,485	4,201	10,350	4,828	3,942	514	172,826	24,416
2557	117,645	13,435	13,910	4,013	10,988	4,708	4,832	656	147,375	22,812
2558	119,971	11,016	12,927	3,684	11,088	3,839	5,560	787	149,546	19,326
2559	125,596	9,688	16,056	3,899	12,915	4,503	6,120	2,487	160,824	20,618
2560	148,979	13,686	21,601	6,166	19,923	6,974	7,814	1,096	198,317	27,922
2561	125,280	14,744	18,057	5,481	21,004	6,935	6,591	9,138	170,932	36,298

หมายเหตุ: อื่น ๆ ได้แก่ สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช สารรมควันพืช สารกำจัดหอย และหอยทาก สารกำจัดไร ไล่เดือนฝอย สารกำจัดหนู

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, กรมวิชาการเกษตร, พ.ศ.2562

เกษตรกรไทยยังนิยมใช้ยากำจัดศัตรูพืชในการทำการเกษตร โดยมีความเชื่อว่า “มีต้นทุนต่ำที่สุด-สะดวกสบายที่สุด” แต่มีข้อมูลเชิงประจักษ์ว่าได้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของเกษตรกรด้วยเช่นกัน เมื่อต้นเดือน ส.ค. 2562 สำนักงานหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ (สปสช.) ได้เปิดเผยว่าจากข้อมูลการเข้ารับบริการในระบบ ‘หลักประกันสุขภาพแห่งชาติ’ หรือ ‘กองทุนบัตรทอง ในช่วง 10 เดือนของปีงบประมาณ 2562 (1 ต.ค. 2561 – 17 ก.ค. 2562) ได้รายงานผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลต่าง ๆ ทั่วประเทศ ในจำนวนนี้เป็นผู้ป่วยที่เข้ารับการรักษาโดยมีสาเหตุจากการได้รับสารเคมีกำจัดศัตรูพืช จำนวน 3,067 ราย เสียชีวิต 407 ราย เบิกจ่ายค่ารักษากว่า 14.64 ล้านบาท โดยข้อมูลนี้แยกผู้ป่วยตามประเภทของสารเคมีที่ได้รับ ดังนี้ 1. ยาฆ่าแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟตและคาร์บาเมต (organophosphate and carbamates insecticides) จำนวน 705 ราย เสียชีวิต 58 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 4.27 ล้านบาท 2. ยาฆ่าหญ้าและยาฆ่าเชื้อรา (Herbicides and fungicides) จำนวน 1,337 ราย เสียชีวิต 336 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 6.79 ล้านบาท และ 3. สารเคมีทางการเกษตรประเภทอื่น ๆ จำนวน 1,025 ราย เสียชีวิต 13 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 3.57 ล้านบาท ทั้งนี้เมื่อดูข้อมูลโดยแยกรายเขตบริการ 13 เขต พบว่า เขตเชียงใหม่มีผู้ป่วยเข้ารับบริการมากที่สุด จำนวน 506 ราย รองลงมา

เขตรักษาพันธุ์ จำนวน 390 ราย เขตนครสวรรค์ จำนวน 340 ราย และนครราชสีมา จำนวน 338 ราย เป็นต้น รายละเอียดดังตาราง ผลกระทบทางสุขภาพของวัตถุอันตรายทางการเกษตร

ตาราง 8 ผลกระทบทางสุขภาพของวัตถุอันตรายทางการเกษตร

วัตถุอันตรายทางการเกษตร	ป่วย (ราย)	เสียชีวิต (ราย)	ค่ารักษาพยาบาล (ล้านบาท)
ยาฆ่าแมลงออร์แกโนฟอสเฟต/คาร์บาเมต	705	58	4.27
ยาฆ่าหญ้า/ฆ่าเชื้อรา	1,337	336	6.79
สารเคมีทางการเกษตรประเภทอื่นๆ	1,025	13	3.57

ที่มา: สำนักงานหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ (สปสช.),พ.ศ.2562

ทั้งนี้พบว่าข้อมูลผู้ป่วยในระบบหลักประกันสุขภาพแห่งชาติในแต่ละปี มีประชาชนจำนวนมากที่เข้ารับการรักษาโดยมีสาเหตุจากการได้รับสารเคมีกำจัดศัตรูพืช โดยปี 2559 มีผู้ป่วยจำนวน 4,876 ราย เสียชีวิต 606 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 22.19 ล้านบาท ปี 2560 มีผู้ป่วย 4,916 ราย เสียชีวิต 579 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 21.85 ล้านบาท และในปี 2561 มีผู้ป่วย 4,736 ราย เสียชีวิต 601 ราย เบิกจ่ายค่ารักษา 21.78 ล้านบาท ซึ่งหากรวมจำนวนผู้เสียชีวิตที่มีสาเหตุจากการได้รับสารเคมีกำจัดศัตรูพืชในช่วง 4 ปี ตั้งแต่ปี 2559-2562 มีจำนวนถึง 2,193 ราย รวมถึงงบประมาณค่ารักษาพยาบาลกว่า 20 ล้านบาทต่อปี ไม่รวมผู้ป่วยในสิทธิรักษาพยาบาลอื่น ๆ สะท้อนให้เห็นผลกระทบของการใช้สารเคมีปราบศัตรูพืชที่เกิดขึ้น โดยถือเป็นข้อมูลเชิงประจักษ์

นอกจากนี้ ยังมีความสูญเสียจากการเสียโอกาสการทำงานของเกษตรกรที่ต้องเข้ารับการรักษาตัว ซึ่งส่วนใหญ่ล้วนเป็นกำลังหลักของครอบครัว และผลกระทบต่อสุขภาพประชาชนในอนาคต ทั้งนี้สำนักงานหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ ยังระบุว่ามโนนโยบายสำคัญในการสร้างนำซ่อมขอสนับสนุนภาคีเครือข่ายและทุกภาคส่วนที่เกี่ยวข้องในการเดินทางมาตรวจการต่าง ๆ เพื่อป้องกันและแก้ไขปัญหาจากพิษสารเคมีอย่างจริงจัง เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบระยะยาวต่อสุขภาพของประชาชน

การปนเปื้อนของสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชในดิน

สารกำจัดศัตรูพืช (pesticides) หมายถึง สารเคมีที่ผลิตขึ้นเพื่อทำลายสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นที่มาแย่งหรือขัดขวางการผลิตอาหารของพืช ใช้เพื่อป้องกันโรคพืชและสัตว์เลื้อยที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ อาจเป็นสารกำจัดแมลง กำจัดเชื้อรา กำจัดหญ้า และสารเร่งการเจริญเติบโต เป็นต้น (สุชาสินี อึ้งสูงเนิน, 2558)

ชนิดของสารกำจัดศัตรูพืช

1. การใช้สารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์แกโนคลอรีน (Organochlorine, OC) และกลุ่มออร์แกโน-ฟอสเฟต (Organophosphate, OP) ต่อเนื่องเป็นเวลานานในสวน หรือพื้นที่ปลูกเคยเป็นสถานที่ที่พืชมีพิษมาก่อน อาจเป็นสาเหตุให้มีการปนเปื้อนสารพิษตกค้างในดิน
2. การปนเปื้อนของสารพิษในพื้นที่ปลูกก่อให้เกิดการปนเปื้อนในผลิตผลได้
3. พืชหัว และพืชที่เจริญเติบโตติดกับพื้นดิน อาจมีสารพิษที่ตกค้างในดินติดไปกับผิวของผลิตผลที่ใช้รับประทาน
4. พืชที่เจริญเติบโตพื้นดิน และห่างจากผิวดิน มีความเสี่ยงต่ำในการปนเปื้อน แต่ต้องเก็บเกี่ยวอย่างระมัดระวังมิให้ ผลิตผลตกลงพื้นดินต้องไม่ปลูกพืชในพื้นที่ปลูกที่มีการตรวจพบปริมาณของสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์แกโน-คลอรีน และกลุ่มออร์แกโนฟอสเฟต เกินค่าความปลอดภัย

การปนเปื้อนโลหะหนักแคดเมียม (Cadmium) ในดิน

1. โลหะหนักเป็นธาตุที่มีอยู่ในดินโดยธรรมชาติ แต่อาจเกิดการปนเปื้อนเพิ่มขึ้นจากขยะและของเสียที่มาจากภาคอุตสาหกรรม อีกทั้งการทำการเกษตรที่มีการใช้ปุ๋ยการผลิตทั้งปุ๋ยและสารกำจัดศัตรูพืช ก็เป็นสาเหตุทำให้เกิดการปนเปื้อนทั้งในดินและผลิตผล
2. การปนเปื้อนของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม ตะกั่ว ในผลิตผลเกินมาตรฐานทำให้มีผลต่อสุขภาพของผู้บริโภค คือทำให้เกิดโรคต่าง ๆ ซึ่งการปนเปื้อนของผลิตผลจะมากหรือน้อยขึ้นกับ ปริมาณและรูปของสารประกอบของแคดเมียมและตะกั่ว ปฏิกริยาของดิน และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

โลหะหนัก (Heavy Metal) หมายถึง โลหะธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะ ตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไป โดยไม่รวมโลหะหนักที่เป็นโลหะอัลคาไล และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท โดยทั่วไปจะเป็นธาตุในตารางธาตุที่มีเลขอะตอมในช่วง 23-92 อยู่ในคาบที่ 4-7 ส่วนใหญ่เป็นธาตุในกลุ่มทรานสิชัน (transition) และโพสทรานสิชัน (post transition) ซึ่งรวมถึง Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb และ Zn

รวมทั้งสารเมทัลลอยด์ (metalloids) เช่น As และ se โลหะหนักที่พบในสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไป มีแหล่งปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมหลายแหล่งแบ่งออกเป็นแหล่งใหญ่ 2 แหล่ง ได้แก่

2.1 การปนเปื้อนจากธรรมชาติ ได้แก่ การปนเปื้อนของโลหะหนักจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น จากหินที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบซึ่งเกิดจากการผุพังหรือถูกกัดเซาะ และการระเบิดของภูเขาไฟ เป็นต้น

2.2 การปนเปื้อนจากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่ การปนเปื้อนของโลหะหนักจากกิจกรรมต่าง ๆ ที่มนุษย์ทำขึ้น เช่น การใช้สารเคมีในการเกษตร การทำเหมืองแร่ และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

2.3 การปนเปื้อนจากการใช้สารเคมีทางการเกษตร เช่น ปุ๋ย สารฆ่าแมลง สารกำจัดวัชพืช โดยในปุ๋ยจะมีตะกั่ว แคดเมียม นิเกิล เมื่อนำสามารถปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้

2.4 การปนเปื้อนจากการทำเหมืองแร่ เช่น การลွ่งแร่สังกะสี จะได้ แคดเมียม ที่เป็นกากของเสียหากไม่มีการกำจัดหรือบำบัดให้ถูกวิธีโลหะหนักสามารถปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ เช่น แหล่งน้ำ อากาศ เป็นต้น

2.5 การปนเปื้อนจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การใช้แคดเมียมในการผลิตสีทาบ้าน สีชุบโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน สีย้อม หมึกพิมพ์ ทองแดงเป็นส่วนประกอบของสารฆ่าแมลง ชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์ให้ความร้อน สังกะสี เป็นส่วนประกอบของสารฆ่าแมลงกลุ่มคาร์บาเมต ตะกั่วใช้ในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ โลหะบัดกรี ฉนวนหุ้มสายเคเบิล

จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ให้ความสนใจแคดเมียม จึงได้ศึกษาคุณสมบัติและความเป็นพิษของแคดเมียม โดยสามารถสรุปได้ ดังนี้ คือ

แคดเมียม (Cadmium: Cd) เป็นโลหะที่มีอยู่ในน้ำตามธรรมชาติประมาณ 0.1-0.2 ไมโครกรัมต่อลิตร น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 112.40 มีจุดหลอมเหลวที่ 321 องศาเซลเซียส และมีจุดเดือดที่ 765 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นเท่ากับ 8.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20 องศาเซลเซียส แคดเมียมมีสมบัติเป็นโลหะอ่อน ตัดได้ง่าย สีขาวและตีแผ่ได้ มีคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์คล้ายกับสังกะสี คือ ทนทานต่อการผุพัง แคดเมียมในธรรมชาติพบอยู่ร่วมกับสังกะสีและตะกั่วเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นผลพลอยได้มาจากการถลุงสังกะสี มีอัตราส่วนระหว่างแคดเมียมต่อสังกะสีเท่ากับ 1 ต่อ 100 ถึง 1 ต่อ 1000 แต่ยังคงมีการนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรโดยเป็นองค์ประกอบของสารเคมีกำจัดวัชพืช (herbicide) สารเคมีกำจัดเชื้อรา (fungicide) ในอุตสาหกรรมใช้เป็นองค์ประกอบ สีทาบ้าน สีชุบโลหะ สีย้อม เซลลามีคัลเลียมไอแก้ว จากการใช้ประโยชน์แคดเมียม ในด้านต่าง ๆ ทำให้เกิดการแพร่กระจายของ

แคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อม และเกิดการสะสมในระบบนิเวศ หากเกิดการสะสมในห่วงโซ่อาหาร จะทำให้เกิดพิษต่อมนุษย์โดยตรง

ความเป็นพิษของแคดเมียมต่อมนุษย์มีทั้งผลเฉียบพลัน และผลแบบเรื้อรัง โดยแคดเมียมที่ปนเปื้อนในอาหารจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยผ่านทางลำไส้ ร้อยละ 3-8 ผ่านระบบทางเดินหายใจร้อยละ 13-15 จะสะสมที่ไต ร้อยละ 33 ตับ ร้อยละ 13.8 ตับอ่อน ร้อยละ 3.3 สะสมที่เนื้อเยื่อใน 1 วัน แคดเมียมสะสมในร่างกาย 2 ไมโครกรัมบางครั้งสูงถึง 3-4 ไมโครกรัม ผู้ที่อาศัยในบริเวณที่มีแคดเมียมสะสมอยู่ในปริมาณสูงความเข้มข้นของแคดเมียม จะเพิ่มขึ้นตามอายุ เนื่องจากค่าครึ่งชีวิตของแคดเมียม (biological half life) นานถึง 16-23 ปี จึงทำให้การสลายตัวใช้เวลานาน

ความเป็นพิษเฉียบพลันของแคดเมียม รับประทานสูงสุด 326 มิลลิกรัมจากอาหาร จะมีอาการปวดหัว ปวดท้องอย่างรุนแรง เสมหะมาก อาเจียน ท้องเดิน ถ้าได้รับ 350 มิลลิกรัมถึง 1 กรัม อาจทำให้เกิดอาการช็อคและตายภายใน 24 ชั่วโมง แคดเมียมที่กระจาย อยู่ในอากาศอยู่ในรูปของแคดเมียมออกไซด์ถ้าได้รับเป็นปริมาณมากจะเป็นอันตรายต่อปอด อย่างเฉียบพลันภายใน 2-4 ชั่วโมง อาการปอดอักเสบ เจ็บหน้าอก และอาจตายได้

พิษเรื้อรังถ้ารับในปริมาณมาก มีผลต่อการสร้างโครงสร้างกระดูก โดยแคดเมียมจะไป ลดการสะสมของแคลเซียม และจะไม่มีการสะสมคอลลาเจนในกระดูก แคลเซียมจะทำให้ เอนไซม์ไลซิโลอกซิเดส (Lysyl oxidase) หดประสิทธิภาพ จึงทำให้กระดูกผุกร่อนเสียรูป ถ้าร่างกายได้รับแคดเมียม 170-500 ไมโครกรัมต่อวันเป็นเวลานานจะก่อให้เกิดโรคโลหิตจาง ความดันโลหิตสูง ส่งผลต่อการทำงานของร่างกายทุกระบบ มีการพบโรคที่เกิดจากพิษของ แคดเมียมครั้งแรกที่เมืองโทยามะ ประเทศญี่ปุ่น โดยเกิดอาการเริ่มต้นที่ไตล้มเหลว ปวด กระดูก จนถึงกระดูกผิดรูป อาการของโรคที่พบมากที่สุด คือ รู้สึกเจ็บจากอาการปวดกระดูก โดยเฉพาะกระดูกต้นขา กระดูกสันหลัง และกระดูกซี่โครง เรียกว่าโรคอิไตอิไต (itai-itai) WHO กำหนดให้มีปริมาณแคดเมียมในน้ำอุปโภคบริโภคได้ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณแคดเมียมที่ร่างกายยอมรับได้ เท่ากับ 20-76 ไมโครกรัมต่อวัน

กระบวนการบำบัดแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

ผลกระทบจากการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่ขาดการจัดการที่เหมาะสม การใช้ สารเคมีในกระบวนการผลิต ในภาคอุตสาหกรรม และการเกษตรที่ขาดความระมัดระวัง ย่อมก่อให้เกิดการทำลายทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม ทำให้สภาพแวดล้อมเสื่อมโทรม มีการ

ปนเปื้อนของสารเคมีในดิน น้ำ และอากาศ เมื่อมีสารเคมีสะสมในปริมาณที่สูงขึ้นย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต รวมทั้งสุขภาพของมนุษย์

เทคโนโลยีดั้งเดิมที่ใช้ในการบำบัดสารพิษหรือฟื้นฟูพื้นที่ที่ปนเปื้อน มักทำโดยการขุดเอาดินที่มีการปนเปื้อนออกจากพื้นที่นั้น แล้วนำไปเผาหรือฝังกลบในพื้นที่อื่น หรืออาจทำโดยใช้วิธีการทางเคมีโดยการใส่สารเพื่อตรึงหรือจับสารให้อยู่กับที่ ลดการแพร่กระจายไปที่อื่น ซึ่งวิธีการทางด้านกายภาพและเคมีดังกล่าว มีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของสารระหว่างการขนย้ายเพื่อไปบำบัดต่อ หรือสารเคมีที่ใช้ในการบำบัด อาจตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้

เทคโนโลยีการฟื้นฟูทางชีวภาพเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยี ที่ใช้กระบวนการย่อยสลายทางธรรมชาติของสิ่งมีชีวิต ได้แก่ จุลินทรีย์ พืช หรือวัสดุชีวภาพในการบำบัดสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม และด้วยความที่เป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ใช้งบประมาณในการดำเนินการน้อย ทำให้เป็นที่ยอมรับของสาธารณชน ในกรณีที่จะประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวในพื้นที่จริงเทคโนโลยีการฟื้นฟูทางชีวภาพแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. Ex situ Technology เป็นเทคโนโลยีการฟื้นฟูโดยการเคลื่อนย้ายตัวกลางที่ปนเปื้อนไปบำบัดหรือกำจัดต่อในสถานที่อื่น

2. In situ Technology เป็นเทคโนโลยีการฟื้นฟูโดยการบำบัดสารเคมีที่ปนเปื้อนในพื้นที่โดยไม่มีการเคลื่อนย้ายตัวกลางไปที่อื่น

นอกจากนี้เทคโนโลยีการฟื้นฟูทางชีวภาพสามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะของเทคโนโลยีที่ใช้ดังนี้

1. Bioaugmentation เป็นเทคโนโลยีการฟื้นฟูที่มีการเติมจุลินทรีย์ลงไปในตัวกลางที่มีการปนเปื้อนสารเคมี เช่น ดิน น้ำ หรือดินตะกอน จุลินทรีย์ที่เติมลงไปอาจเป็นจุลินทรีย์สายพันธุ์ที่มีใน พื้นที่นั้น (indigenous) หรืออาจเป็นจุลินทรีย์สายพันธุ์ต่างถิ่น (exogenous) ก็ได้ โดยจุลินทรีย์ที่เติมลงไปนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายสารปนเปื้อนในพื้นที่นั้น

2. Bioventing เป็นเทคโนโลยีที่ดำเนินการในพื้นที่ (*In situ*) โดยการเติมอากาศและ/หรือสารอาหารลงไปในระบบ ซึ่งการเติมอากาศของ bioventing จะเป็นการเติมในอัตราที่ต่ำ ไม่มีการเพิ่มแรงดัน เพื่อเป็นการกระตุ้นการเจริญเติบโตและกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในพื้นที่ (indigenous microorganisms) และป้องกันการระเหย (volatilization) ของสารปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดออกสู่บรรยากาศ

3. Biosparging เป็นการเติมอากาศเข้าสู่ระบบภายใต้สภาวะที่มีแรงดันเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนในชั้นน้ำใต้ดิน (saturated zone) ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้น

4. Landfarming ดินที่ปนเปื้อนที่ถูกขุดขึ้นมาจะถูกนำมาแผ่ลงบนพื้นที่ที่เตรียมไว้และมีการกลับกองดินเป็นระยะ ๆ เพื่อเพิ่มออกซิเจนให้กับระบบ ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายเพิ่มขึ้น

5. Composting เป็นเทคโนโลยีที่ใช้บำบัดสารปนเปื้อนในดิน โดยนำดินที่ปนเปื้อนผสมกับอินทรีย์วัตถุในอัตราส่วนที่เหมาะสม เช่น มูลสัตว์ ของเหลือทิ้งจากกระบวนการทางการเกษตร เป็นต้น วัตถุอินทรีย์ที่เติมลงไปจะช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของประชากรจุลินทรีย์ ทำให้อุณหภูมิจนของระบบสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นปัจจัยกระตุ้นให้อัตราการย่อยสลายเพิ่มขึ้นด้วย

6. Bioreactor เป็นถังปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับบำบัดดิน น้ำ ดินตะกอน กากตะกอนจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมหรือจากระบบบำบัดต่าง ๆ ตัวกลางที่ปนเปื้อนจะถูกนำมาใส่ในถังปฏิกรณ์ ซึ่งอาจมีการเติมออกซิเจน สารอาหารต่าง ๆ จุลินทรีย์ หรืออาจมีการปรับสภาวะต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรดเป็นด่าง ให้เหมาะสมเพื่อให้กระบวนการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ

เทคโนโลยีการฟื้นฟูดังกล่าวข้างต้น เป็นเทคโนโลยีที่ใช้กระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ซึ่งอาจเกิดขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจน หรือไม่มีออกซิเจนก็ได้ ดังนั้น ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโต หรือมีผลต่อเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ ย่อมส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการฟื้นฟูด้วยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการฟื้นฟูทางชีวภาพได้แก่

1. จุลินทรีย์ คุณสมบัติของจุลินทรีย์ เช่น อัตราการเจริญเติบโต การกลายพันธุ์ การผลิตเอนไซม์ที่ใช้ในกระบวนการย่อยสลาย ปริมาณจุลินทรีย์ในพื้นที่ จะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการย่อยสลาย

2. สภาพแวดล้อม ได้แก่ สารอาหาร อุณหภูมิ ความเป็นกรดเป็นด่าง ความเข้มข้นของแสง ปริมาณออกซิเจนที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ย่อมส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายด้วย

3. ลักษณะของสารที่ปนเปื้อน ได้แก่ ประเภท ปริมาณหรือระดับความเข้มข้นของสารคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารนั้น ซึ่งสารใดที่ถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ดี แสดงว่า สารนั้นมี bioavailability สูง จุลินทรีย์สามารถนำสารนั้นเข้าสู่เซลล์ และ เกิดกระบวนการย่อยสลายได้ง่าย

ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีการฟื้นฟูทางชีวภาพจะส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่ก็ยังมีข้อจำกัดหลายประการ ซึ่งสามารถสรุปเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัด ของเทคโนโลยีการฟื้นฟูทางชีวภาพได้ดังตาราง 9

ตาราง 9 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อจำกัดของเทคโนโลยีการฟื้นฟูทางชีวภาพ

ข้อดี	ข้อจำกัด
1. เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ	1. กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพไม่สามารถเกิดขึ้นได้ กับสารทุกชนิด
2. สามารถประยุกต์ใช้ได้กับทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์	2. สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการย่อยสลาย อาจเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ได้
3. กระบวนการย่อยสลายสามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ไม่เกิดผลกระทบตกค้างในสิ่งแวดล้อม	3. ต้องการสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งเป็นลักษณะที่ค่อนข้างมีความจำเพาะเจาะจงสูง
4. สามารถทำการฟื้นฟูในพื้นที่จริงได้	4. ใช้เวลานาน
5. ใช้ค่าใช้จ่ายน้อย	
6. เป็นที่ยอมรับของสาธารณชน	

นอกจากจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในการบำบัดและฟื้นฟูสภาพแวดล้อมแล้ว การใช้พืชเป็นเทคโนโลยีทางเลือกอีกวิธีหนึ่ง ที่สามารถ ใช้ลดปริมาณการปนเปื้อนของสารต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อมได้ ปัจจุบันเทคโนโลยีนี้ได้รับความนิยมและมีการศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวาง Phytoremediation Technology หรือ เทคโนโลยีการใช้พืชเพื่อฟื้นฟูสภาพแวดล้อม สามารถใช้ได้ทั้งในดิน แหล่งน้ำ กากตะกอนจากกระบวนการผลิต หรือระบบบำบัด สามารถแบ่งเทคโนโลยีการฟื้นฟูโดยใช้พืชออกได้ดังนี้

1. Phytoextraction และ Phytoaccumulation เป็นกระบวนการที่พืชนำเอาสารที่ปนเปื้อนเข้าสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืช และเก็บสะสมไว้ตามส่วนต่าง ๆ ของพืชได้แก่ ราก ลำต้น ใบ ดอก หรือผล ขึ้นอยู่กับชนิดพืชและคุณสมบัติของสารชนิดนั้น ในกระบวนการนี้พืชที่มีมวล (biomass) มากจะทำให้การสะสมสารปนเปื้อนในส่วนต่าง ๆ ของพืชได้มากขึ้น ส่งผลให้ลดปริมาณการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมลดลง พืชที่ใช้ในกระบวนการฟื้นฟูจะถูกนำไปบำบัดต่อ

โดยวิธีการที่เหมาะสม เช่น เผาหรือฝังกลบ และถ้าหากมีปริมาณมากพอ อาจนำส่วนต่าง ๆ ของพืชไปสกัดสารปนเปื้อนออกมา และนำไปใช้ประโยชน์ใหม่ (recycle) ได้อีก

2. Phytodegradation สารที่ผ่านกระบวนการนี้ส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ กระบวนการย่อยสลาย จะเกิดขึ้น โดยกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในต้นพืชเอง โดยพืชแต่ละชนิดจะมีกลไกการกำจัดสารที่แตกต่างกัน

3. Phytostabilization คือ การที่พืชมีกลไกบางอย่างที่ช่วยลดการเคลื่อนที่ของสารในตัวกลาง ทำให้จำกัดขอบเขต การแพร่กระจายของสารในพื้นที่ลง พืชจะทำหน้าที่ตรึงสารที่ปนเปื้อนไว้ที่รากพืชหรืออาจปล่อยสารบางชนิดที่ช่วยจับสารและตรึงไว้กับอนุภาคดิน

4. Rhizodegradation สารที่ปนเปื้อนจะถูกย่อยสลายโดยกระบวนการร่วมกันของพืชกับจุลินทรีย์บริเวณรอบรากพืช (rhizosphere metabolism)

เทคโนโลยีการฟื้นฟูโดยใช้พืชเหมาะสมที่จะใช้กับพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนเป็นบริเวณกว้าง ปริมาณ หรือ ระดับความเข้มข้นของสารที่ปนเปื้อน เป็นปัจจัยจำกัดปัจจัยหนึ่ง ซึ่งหากพื้นที่ที่ปนเปื้อนมีระดับการปนเปื้อนที่ค่อนข้างสูง อาจส่งผลกระทบต่อพืชได้ เช่น พืชมีอัตราการเจริญเติบโตที่ลดลง และอาจต้องใช้ระยะเวลาในการฟื้นฟูที่นานขึ้น นอกจากนี้ การเลือกชนิดพืชที่ใช้ในการฟื้นฟู นับว่า มีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง และไม่ควรถือเลือกพืชที่ใช้ในการบริโภคหรือเป็นพืชที่อยู่ในห่วงโซ่อาหาร

โดยสรุป การนำเทคโนโลยีการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยวิธีทางชีวภาพ เป็นเทคโนโลยีที่สามารถลดการปนเปื้อนสารพิษในสิ่งแวดล้อมได้ แต่เนื่องจากวิธีการต่าง ๆ ค่อนข้างมีความจำเพาะเจาะจงกับลักษณะของพื้นที่และสารที่ปนเปื้อน การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการฟื้นฟูให้มีประสิทธิภาพสูงสุด จึงต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ ชนิดพืช ลักษณะของพื้นที่ที่ปนเปื้อน และประเภทของสารที่ต้องการกำจัด

ที่มา: อัจฉราพร ขำโสภา คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, พ.ศ.2550

กระบวนการในการบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ

การบำบัดมลพิษทางชีวภาพ เป็นกระบวนการบำบัดมลพิษที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมด้วยวิธีทางชีวภาพที่ทำให้บริสุทธิ์เกิดขึ้น โดยอาศัยความสามารถของจุลินทรีย์หรือพืชในการย่อยสลายของสารมลพิษให้หมดไปหรือการเปลี่ยนแปลงสารมลพิษที่มีความเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมให้มีความเป็นพิษน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากการบำบัดมลพิษทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยจุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อม หรือการใช้จุลินทรีย์ที่เติมลงไปเพื่อย่อย

สลายมลพิษให้มีความเป็นพิษน้อยลงหรือเพื่อใช้สารมลพิษเหล่านั้นเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์รวมไปถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเจริญแบบวิถีเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์เหล่านั้นองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญของการบำบัดสารพิษทางชีวภาพ ได้แก่

1. จุลินทรีย์และวิถีเมแทบอลิซึม จุลินทรีย์เป็นตัวที่สำคัญที่สุดของกระบวนการบำบัดมลพิษทางชีวภาพ และกระบวนการในการย่อยสลายต้องอาศัยเอนไซม์ในจุลินทรีย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในทางชีวภาพ และกระบวนการบำบัดนี้ก็ต้องขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ เนื่องจากจุลินทรีย์แต่ละชนิดมีการสร้างเอนไซม์ที่แตกต่างกัน ชนิดของเอนไซม์มีผลต่อประเภทของปฏิกิริยาการย่อยสลายสารมลพิษเป้าหมาย และมีผลต่อวิถีเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์นั้นต่อสารมลพิษ ซึ่งจุลินทรีย์อาจจะมีความสามารถในการย่อยสลายมลพิษนั้นด้วยตัวมันเองหรืออาศัยการทำงานร่วมกันของกลุ่มจุลินทรีย์เพื่อให้การย่อยสลายมลพิษมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. แหล่งพลังงานและตัวรับอิเล็กตรอน นอกจากจะขึ้นอยู่กับจุลินทรีย์แล้ว ประเภทของตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย และวิธีขนส่งอิเล็กตรอนซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีกระบวนการที่แตกต่างกันออกไป

3. ความชื้น มีผลต่อการบำบัดมลพิษที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมซึ่งมีผลต่อการเจริญและกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ การกระจายตัวและอัตราการสลายของก๊าซรวมถึงออกซิเจนในน้ำ ชนิดและปริมาณของมลพิษที่จุลินทรีย์สามารถนำมาใช้ได้ ระดับความเป็นพิษของสารเคมี มีรายงานว่าปริมาณความชื้นมีความเหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายสารมลพิษคือ ช่วง 50-70% ซึ่งในจุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความเหมาะสมกับระดับความชื้นแตกต่างกัน

4. ความเป็นกรด-ด่าง ของสิ่งแวดล้อมมีผลต่อการดูดซึมสารอาหาร การทำงานและการเจริญของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายมลพิษ มีรายงานถึงค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์โดยทั่วไปในดินอยู่ในช่วง 5.5-8.8 แต่ช่วงที่เหมาะสมที่สุดต่อการเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพคือช่วง 5.5-8.0

5. สารอาหารเป็นสิ่งจำเป็นต่อการเจริญและการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ซึ่งจุลินทรีย์จะดูดซึมสารอาหารจากสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติเพื่อการแบ่งเซลล์และการเพิ่มจำนวนเซลล์โดยแหล่งอาหารที่สำคัญ เช่น คาร์บอน ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

จุลินทรีย์ในธรรมชาติบางชนิดมีความสามารถในการปรับตัวของเซลล์ให้ทนทานต่อความเป็นพิษของมลพิษในสิ่งแวดล้อม และมีความสามารถในการเหนี่ยวนำเพื่อสร้างเอนไซม์และเมแทบอลิซึมที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสารเหล่านี้เพื่อนำมาใช้เป็นสารอาหารในการเจริญสร้างเซลล์ใหม่และในการสร้างพลังงานจุลินทรีย์ลักษณะนี้พบได้ในสิ่งแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนของสารพิษ เช่น ดิน น้ำ น้ำบาดาล เป็นต้น

การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน

การย่อยสลายทางชีวภาพเป็นการทำลายสารปนเปื้อน โดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ สารปนเปื้อนเหล่านี้เป็นแหล่งอาหารหรือซับสเตรทของจุลินทรีย์ กระบวนการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์หรือที่เรียกว่า mineralization เกี่ยวข้องกับการออกซิไดซ์สารเหล่านั้นให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำซึ่งเป็นกระบวนการที่ให้ทั้งคาร์บอนและพลังงานเพื่อการเจริญและการสืบพันธุ์ของเซลล์โดยจะเกิดได้ทั้งสถานะที่มีและไม่มีออกซิเจน การย่อยสลายแต่ละขั้นตอนเกิดจากการเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์ที่มีจุลินทรีย์สร้างขึ้นมา การกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ เกิดได้โดยปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้แก่ oxidation reduction และ hydrolysis เป็นต้น

จุลินทรีย์ในดินที่เกิดการย่อยสลายโมเลกุลสารกำจัดวัชพืช ได้แก่ แบคทีเรีย เชื้อรา และแอกติโนมัยสิต จุลินทรีย์จะใช้พลังงานจากโมเลกุลของสารเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการหายใจ การสร้างโปรตีน และการขยายพันธุ์ แล้วปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา จึงเท่ากับทำให้โมเลกุลของสารกำจัดวัชพืชออกไปจากดินได้

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลาย โดยจุลินทรีย์ในดิน ได้แก่ ชนิดของจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสาร ความถี่ในการใช้สารกำจัดวัชพืช ระบบการปลูกพืชมีผลต่อจำนวนจุลินทรีย์และชนิด พฤติกรรมทางเคมีและฟิสิกส์ของสารกำจัดวัชพืชในดิน เช่น สารบางชนิดจะถูกดูดซับอย่างรุนแรง ก็จะไม่ถูกย่อยสลาย และระดับกิจกรรมของจุลินทรีย์ซึ่งได้รับอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณออกซิเจน เป็นต้น

แบคทีเรียที่มีความสามารถในการบำบัดมลพิษ

ในปัจจุบันมีการรวบรวมดัชนีชนิดของแบคทีเรียที่มีความสามารถในการบำบัดสารมลพิษต่าง ๆ โดยรวบรวมเป็นฐานข้อมูลต่าง ๆ แบคทีเรียเหล่านั้นสามารถย่อยสลายสารจำพวกไฮโดรคาร์บอนสายตรงอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายตรง และอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนกับหมู่ คลอโรไซยาโน ไนโตรฟอสฟอริล รวมถึงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบวง เป็นต้น จึงสามารถจำแนกแบคทีเรียที่มีความสามารถในการบำบัดได้ถึง 3 กลุ่ม ดังนี้

ตาราง 10 กลุ่มของแบคทีเรียที่มีความสามารถในการย่อยสลายมลพิษในสิ่งแวดล้อม

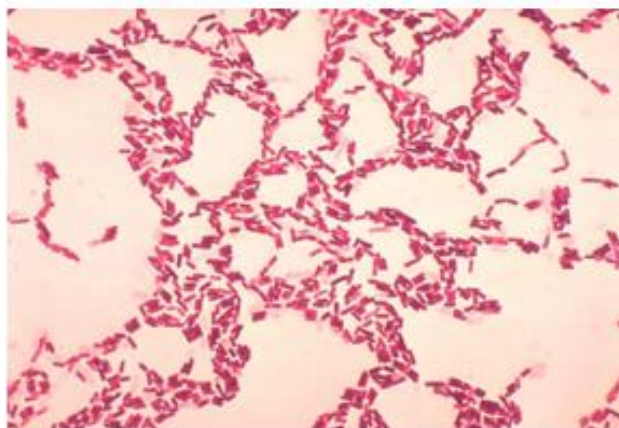
กลุ่มแบคทีเรียที่มีความสามารถในการย่อยสลายมลพิษ	ชนิดของแบคทีเรีย
แบคทีเรียแกรมบวกที่มีองค์ประกอบของ G+C สูง (High G+D gram -positive bacteria)	Arthrobacter, Brevibacterium, Clavibacter, Dehalobacter, Nocardia, Rhodococcus, Streptomyces, Terrabacter, Corynebacterium
แบคทีเรียแกรมบวกที่มีองค์ประกอบของ G+C ต่ำ (Low G+D gram -positive bacteria)	Bacillus, Clostridium, Desulfitobacterium, Eubacterium, Staplylococcus
แบคทีเรียแกรมลบในหมวดโปรติโอแบคทีเรีย (Protiobacteria gram-negative)	
- กลุ่มอัลฟา	Agrobacterium, Ancylobacter, Chelatobacter, Hyphomicrobium, Methylobacterium, Paracoccus, Rhodobacter, Sphingomonas
- กลุ่มบีตา	Achromobacter, Alcaligenes, Azoarcus, Burkholderia, Hydrogenophaga, Comanas, Ralstonia, Thauera, Thiobacillus
- กลุ่มแกมมา	Acinebacter, Aeromonas, Azotobacter, Escherichia, Enterobacter, Klebsiella, Methylabacter, Pseudomonas, Methylococcus, Moraxella
- แอปซิลอน	Desulfovibrio

จุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงโครงสร้าง

จากการศึกษาและรวบรวมเอกสารทางด้านจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงโครงสร้างดิน และเป็นจุลินทรีย์ที่ทางบริษัทไบโคง จำกัด ใช้ในผลิตภัณฑ์ในกลุ่มหัวเชื้อจุลินทรีย์ ทั้งในกลุ่มของแบคทีเรีย เชื้อรา โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตาราง 11 รายชื่อจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงโครงสร้างดิน

จุลินทรีย์	ประโยชน์
<i>Bacillus subtilis</i>	หลังเอนไซม์พวก Carbohydrate และ Protease ออกจากเซลล์สามารถย่อยสลายสารต่าง ๆ ได้หลาย ชนิด เช่น Cellulose, แป้งต่าง ๆ และโปรตีนต่าง ๆ
<i>Azotobacter</i> sp.	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถตรึงไนโตรเจน - สร้างสารปฏิชีวนะยับยั้งการเจริญเติบโตของราในดิน - มีประโยชน์ต่อการงอกของเมล็ดของพืช
<i>Bacillus subtilis</i>	หลังเอนไซม์พวก Carbohydrate และ Protease ออกจากเซลล์สามารถย่อยสลายสารต่าง ๆ ได้หลาย ชนิด เช่น Cellulose, แป้งต่าง ๆ และโปรตีนต่าง ๆ
<i>Azotobacter</i> sp.	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถตรึงไนโตรเจน - สร้างสารปฏิชีวนะยับยั้งการเจริญเติบโตของราในดิน - มีประโยชน์ต่อการงอกของเมล็ดของพืช
<i>Achromobacter</i> sp.	สามารถย่อยสลายฟอสเฟตละลายออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืช
<i>Nitrobacter</i> sp.	<ul style="list-style-type: none"> - ย่อยอินทรีย์วัตถุ - ให้ธาตุไนโตรเจน
<i>Rhizobium</i>	ตรึงไนโตรเจนจากอากาศ
<i>Aspergillus</i> sp.	ย่อยสลายสารต่าง ๆ เซลล์ของพืช
<i>Saccharomyces</i> sp.	ละลายฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่ถูกดินยึดไว้ ให้พืชสามารถนำไปใช้ได้มากยิ่งขึ้น ให้ธาตุอาหารรองแก่พืช (S, Ca, Mg และอื่นๆ)
<i>Trichoderma</i> sp.	<ul style="list-style-type: none"> - ยับยั้งและทำลายเชื้อราสาเหตุโรคพืช - ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช
<i>Beauveria bassiana</i>	กำจัดแมลงศัตรูพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น กำจัดปลวก เพลี้ยไฟ เพลี้ยกระโดด ไรขาว หนอนเจาะฝัก เป็นต้น
<i>Metarhizium</i> sp.	กำจัดแมลงศัตรูพืช



ภาพ 4 Bacillus subtilis

ลักษณะรูปร่าง(Morphology)

เซลล์เป็นรูปท่อนตรง ขนาด $0.3 - 2.2 \times 1.2 - 7.0$ ไมโครเมตร ส่วนใหญ่สามารถเคลื่อนที่ได้ ติดสีแกรมบวก เป็นจุลินทรีย์ Gram-positive หายใจโดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย *B. subtilis* เป็น rod-shaped group สามารถที่จะผลิต robust endospore ในการเป็นปฏิปักษ์ต่อ microorganism อื่นได้ มีโครงสร้างที่เป็นส่วน refractile สูง อยู่ตรงบริเวณ cell และ Endospores เป็น widespread มี Arrangement ทั้งแบบ chains or single ซึ่ง Forms colonies ของ *B. Subtilis* จะเป็นแบบ dull และอาจมีลักษณะ wrinkled เป็นสี cream ถึง brown มี Cell shape แบบ bacillus

ลักษณะทางชีวเคมี/สรีรวิทยา(Biochemistry/physiology)

B. subtilis มีคุณสมบัติเป็น adherence , resistance และ tactical responses โดยบริเวณผิวของ cell จะเป็นแผ่นโครงสร้างจะประกอบด้วย capsule , proteinaceous surface layer , several layers ของ peptidoglycan sheeting และ protein บริเวณส่วนนอกของพื้นผิว plasma membrane

แหล่งอาศัย/นิเวศวิทยา (Habitat/Ecology)

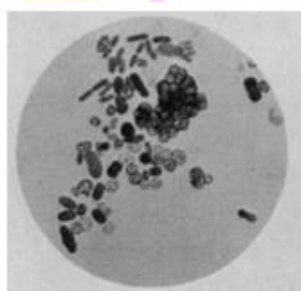
เป็นจุลินทรีย์ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก ส่วนใหญ่เกิดจากแหล่งน้ำและอาหาร และพบได้ทั่วไปในดิน เจริญเติบโตได้โดยใช้สารอาหารจากการย่อยสลายของ ซากพืช ซากสัตว์ และอื่น ๆ แบคทีเรียจำพวก *Bacillus subtilis* สร้างและ ได้หลายชนิดทำให้สามารถย่อยสลายสารต่าง ๆ ได้หลาย ชนิด เช่น cellulose, แป้งต่าง ๆ และโปรตีนต่าง ๆ ได้มาก ส่วนใหญ่จะพบประมาณ $10^7 - 10^8$ เซลล์ในดิน 1gm แต่ถ้าในดินที่มีสารอาหารน้อยก็อาจจะพบในจำนวนน้อย เป็นจุลินทรีย์ที่มีการเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะทำ

การเพาะเจริญใน nutrient agar และ nutrient broth การเจริญของ *B.subtilis* เป็นแบบ Unicellular rod แต่มานาน ๆ ครั้งจะเป็น แบบ chains จะเจริญ ในอาหารที่ไม่เป็นกรดและจะใช้ ออกซิเจนในการหายใจ

ความน่าสนใจในแบคทีเรียชนิดนี้ในทางอุตสาหกรรมอีกอย่างหนึ่งคือมีความหลากหลาย ในทางชีวเคมีที่ทำให้สามารถปรับตัวให้อยู่ได้ในสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง หรือ extreme condition ต่าง ๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการทนต่อความร้อน ที่อุณหภูมิสูง และสภาพเป็นด่าง ได้อย่างดี มีหลายชนิดสามารถเจริญเติบโตได้แม้ในที่อุณหภูมิสูง ความ 60°C หรือโตได้ดีในอุณหภูมิ 50 °C หรือมีอุณหภูมิต่ำสุดที่ยังเติบโตได้ที่ระดับ อุณหภูมิสูงกว่า 30°C เป็นต้น คุณสมบัติการทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นที่ต้องการอย่างมากในทางอุตสาหกรรม เนื่องจาก เอนไซม์ที่สร้างจากแบคทีเรียชนิดนี้จะทนทานได้ดีที่ อุณหภูมิสูง ทำให้ทนทานต่อระดับอุณหภูมิสูง ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมและมีอายุ การใช้งานที่นาน ทั้งทนทานต่อสารที่มักทำลาย โปรตีนได้เช่น detergent และ organic solvents เป็นต้น

สำหรับ alkalophilic bacilli ที่ทนความต่อ pH สูงหรือความเป็นด่างได้นั้น มีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมการผลิตเอนไซม์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอนไซม์ที่ใช้ในผงซักฟอกหรือน้ำยา ทำความสะอาดต่าง ๆ ส่วนใหญ่ที่นำมาใหญ่คือเอนไซม์ protease จากการที่แบคทีเรีย ชนิด *Bacillus subtilis* มีความปลอดภัยต่อการใช้สูง ทั้งยังสามารถหลังสารที่ผลิตขึ้นออกสู่นอกเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้มีการนำแบคทีเรียชนิดนี้ไปใช้เป็น เซลล์เจ้าบ้าน สำหรับการโคลนยีนที่ใช้ใน การผลิตสารต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นสายพันธุ์ผู้ผลิตสารนั้น ๆ อย่างมาก

2. *Azotobacter* sp.



A



B

ภาพ 5 ลักษณะเซลล์ของแบคทีเรีย *Azotobacter* sp. (A) และ ลักษณะของซิสต์ของแบคทีเรีย *Azotobacter* sp.(B)

ลักษณะสัณฐานวิทยา

1. เป็นแบคทีเรียแอโรบ สามารถตรึงไนโตรเจนให้กลายเป็นไนเตรตเพิ่มแร่ธาตุให้ดินได้โดยต้องอาศัยออกซิเจนในการเจริญเติบโต
 2. มีชีวิตอยู่อย่างอิสระในดิน(Free living) และสามารถตรึงไนโตรเจนจากบรรยากาศได้แบบ non symbiotic nitrogen fixation
 3. มีรูปร่างแบบแท่งสั้นปลายมน (coccobacillus) เซลล์เป็นรูปไข่ขนาดใหญ่
 4. ไม่สร้างเอนโดสปอร์(endospore) แต่สร้างโครงสร้างพิเศษที่เรียกว่า ซีสต์(cyst) ซึ่งติดสีแกรมลบ โดยการสร้างซีสต์ จะสร้างเมื่อสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมกับการเจริญเติบโต ซีสต์จะมีเซลล์ที่มีชีวิตอยู่ภายใน มีผนัง 2 ชั้น เมื่อสภาพเหมาะสมก็จะเจริญเป็นเซลล์ต่อไป
 5. เคลื่อนที่ได้โดยอาศัย แสรอบเซลล์(peritrichous flagellate) ซึ่งมีความยาวของคลื่น 2.5 ถึง 3.3 ไมโครเมตร
 6. โคลินี้ไม่เป็นเมือกแต่โคลินนี้อาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการสร้างโพลีแซคคาไรด์หรือสารเหนียว(gum)ออกมามาก
 7. ใช้แอมโมเนียและไนเตรตเป็นแหล่งไนโตรเจนได้ แต่การตรึงไนโตรเจนจะหยุดลงไม่ใช้สามารถใช้กลูตาเมต(Glutamate)ได้
 8. สามารถสร้างรงควัตถุสีน้ำตาลดำหรือเมลานิน ไม่ละลายน้ำ ซึ่งจัดเป็นพวกเคโมออแกโนโทรฟ
 9. pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วงที่สูงกว่า 6เล็กน้อยหรือช่วงกลางถึงต่ำ
 10. อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต คือ 37 องศาเซลเซียส แต่สามารถทนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสได้นาน 10 นาที จะตายเมื่ออุณหภูมิสูง 60 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที
- เชื้อ *Azotobacter chroococcum* นี้สามารถตรึงไนโตรเจนได้ตั้งแต่ 2 ถึง 15 มิลลิกรัมของไนโตรเจนต่อกรัมคาร์บอนที่ใช้ เชื้อนี้สามารถสร้างและขับสารต่าง ๆ ออกมาได้มากมาย เช่น ไทอามีน(thiamine), ไรโบฟลาวิน(riboflavin), ไซยาโนโคบาลามีน (cyanocobalamine), กรดนิโคตินิก (nicotinic acid), กรดแพนโทเทนิค(pantothenic acid), กรดอินโดลอะซิติก(indole acetic acid) และ จิบเบอเรลลิน (gibberellin) หรือสารที่มีคุณสมบัติคล้ายจิบเบอเรลลิน นอกจากนี้ยังสามารถสร้างสารปฏิชีวนะยับยั้งการเจริญเติบโตของราในดินบางชนิดได้ ดังนั้นจึงนับว่ามีประโยชน์ต่อการงอกของเมล็ดของพืชด้วย

การตรึงไนโตรเจนเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องการออกซิเจน เนื่องจากเชื้อ *Azotobacter chroococcum* เป็นแอโรบ (aerobe) การสร้างพลังงาน(ATP) ก็ต้องการออกซิเจนด้วย ดังนั้นจึงมีกรรมวิธีในการป้องกันออกซิเจนในกระบวนการนี้ คือ

1. การมีเนื้อเยื่อล้อมรอบเอนไซม์ไนโตรจีเนส
2. การป้องกันเอนไซม์ไนโตรจีเนสโดยการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างทางฟิลิกส์ของไนโตรจีเนส เพื่อจะทนต่อออกซิเจนได้
3. การมีสารเมือก(slime) มากมายรอบเซลล์ทำให้ออกซิเจนซึมเข้าสู่ภายในน้อยที่สุด
4. การที่เชื้อหายใจเพิ่มขึ้นจะช่วยกันออกซิเจนจากเอนไซม์ไนโตรจีเนสได้



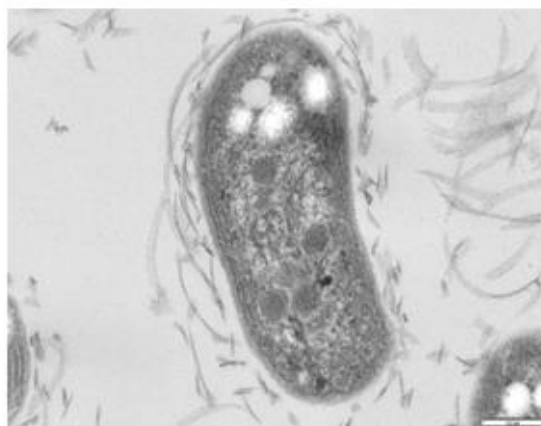
ภาพ 6 *Achromobacter* sp.

ลักษณะทั่วไป

เป็นแบคทีเรีย มีรูปร่างเป็นท่อน เคลื่อนที่ด้วยแฟลเจลลา (flagella) เป็นแบคทีเรียประเภทที่ต้องการออกซิเจน (aerobic bacteria) เจริญได้ดีในภาวะที่มีอากาศเท่านั้น (obligate aerobe) สามารถย่อยสลายฟอสเฟตละลายออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืช โดยปกติฟอสฟอรัสที่พบอยู่ในดินจะมีอยู่ 2 รูป คือ ฟอสฟอรัสอินทรีย์ (Organic phosphorus) เช่น ไฟติน (Phytin) ฟอสโฟไลปิด (Phospholipid) กรดนิวคลีอิก (Nucleic acid) อีกรูปหนึ่งคือฟอสฟอรัสอนินทรีย์ (Inorganic phosphorus) เช่น สารประกอบของแคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก อลูมิเนียม และฟลูออรีน ปริมาณฟอสฟอรัสในดินที่อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีอยู่น้อยมาก ส่วนใหญ่จะถูกตรึงโดยปฏิกิริยาทางเคมีในรูปตกตะกอนไม่ละลาย เช่น ตกตะกอนของแคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก อลูมิเนียม เมื่อดินเป็นกรดหรือเป็นด่าง หรือฟอสเฟตทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียมแล้วตกตะกอนหรือถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของอนุภาคดินหรือฟอสเฟต ทำปฏิกิริยากับสารละลายดินหรือคอลลอยด์

ของแร่ดินเหนียว โดยฟอสเฟตจะแลกเปลี่ยนกับ hydroxyl group (OH^-) ของดินเหนียว ฟอสเฟตแลกเปลี่ยนกับแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Calcium) ที่ดูดยึดอยู่ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว ฟอสเฟตถูกดูดซับอยู่ตามผิวของอนุภาคดินเหนียวที่ยังมีประจุบวกค้างอยู่ การตรึงฟอสฟอรัสโดยปฏิกิริยาทางเคมี ถ้าหากเกิดขึ้นมากจะทำให้พืชขาดธาตุฟอสฟอรัส เนื่องจากไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เพราะอยู่ในรูปฟอสฟอรัสอินทรีย์

นอกจากนี้จุลินทรีย์ในดินสามารถดูดซับฟอสฟอรัสอินทรีย์ในดิน เพื่อการเจริญเติบโต โดยสะสมอยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ในรูปของ ฟอสโฟไลปิด DNA, RNA, ATP และจะถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อจุลินทรีย์ตายและถูกย่อยสลาย และพืชสามารถดูดซับไปใช้ประโยชน์ได้ เพราะเป็นฟอสฟอรัสอินทรีย์



ภาพ 7 *Nitrobacter* sp.

ลักษณะทั่วไป

รูปร่างกลม(Cocci) หรือ ท่อน(Rod),

เป็นแบคทีเรียแกรมลบ หรือ Gram variable

ไม่สร้างสปอร์

เคลื่อนที่ได้(Motile) / ไม่เคลื่อนที่(non – Motile)

Chemolithotrophic, Anaerobic bacteria

รับพลังงานโดยใช้ Hydrogen หรือ Organic Compound เป็นตัวให้ electron เพื่อ reduced คาร์บอนไดออกไซด์เป็นมีเทน

ประโยชน์ทางการเกษตร

ให้ธาตุไนโตรเจน (N) แทนยูเรีย

ย่อยอินทรีย์วัตถุ ให้แตกตัวออกเป็นแอมโมเนีย โดยจุลินทรีย์เป็นแบคทีเรียเชื้อราและแอคติโนมัยซิส จากนั้นแอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์ (oxidize) ให้เป็นไนโตรทและไนเตรท และไนเตรทที่เกิดขึ้นก็จะเป็นอาหารพืชและบางส่วนก็อาจจะถูกชะล้างไปโดยนำไปสู่แหล่งน้ำใต้ดิน

การทนต่อโลหะหนักของแบคทีเรีย

แบคทีเรียอยู่ร่วมกับโลหะหนักที่เป็นพิษมาตั้งแต่ยุคแรกของการมีสิ่งมีชีวิต หรือประมาณสี่พันล้านปีก่อน แบคทีเรียต้องปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมจึงจะมีชีวิตอยู่ได้ในสิ่งแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลง เช่นอุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง การปรับตัวเหล่านี้ทำให้เกิดวิวัฒนาการในการเปลี่ยนแปลงสารพันธุกรรม หรือยีน เนื่องจากการได้รับการกระตุ้นจากโลหะหนักทำให้แบคทีเรียสามารถมีชีวิตอยู่ร่วมกับโลหะหนักได้ โดยการควบคุมกลไกการทนต่อโลหะหนักด้วยยีนนั้น โลหะบางชนิด เช่น ทองแดง สังกะสี โครเมียม นิกเกิล เป็นธาตุที่จำเป็นในปริมาณน้อยใช้เป็นตัวประกอบในการสร้างเอนไซม์และการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่โลหะหนักส่วนใหญ่เป็นโลหะที่จำเป็นต่อแบคทีเรีย และเป็นพิษต่อแบคทีเรียโลหะหนักจะทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่สำคัญภายในเซลล์ด้วยพันธะโคเวเลนต์และพันธะไอออนิก ที่ความเข้มข้นสูงโลหะหนักทั้งที่จำเป็นและไม่จำเป็นมีความเป็นพิษโดยจะทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ เปลี่ยนแปลงความจำเพาะต่อเอนไซม์ รบกวนการทำหน้าที่ขององค์ประกอบภายในเซลล์ และทำลายโครงสร้างดีเอ็นเอ แบคทีเรียจึงต้องมีการพัฒนาเพื่อให้ทนต่อโลหะหนักโดยมีการสร้างกลไกในการต้านทานพิษของโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม โดยการสร้างยีนที่ทนต่อพิษของโลหะหนักที่มีลักษณะการทำงานเหมือนกับยีนสำหรับต้านทานยาปฏิชีวนะ โดยยีนนี้จะอยู่ใน Plasmids และ Transposons ของแบคทีเรีย

แบคทีเรียได้พัฒนากลไกหลายวิธีเพื่อทนต่อโลหะหนักที่นำเข้าสู่เซลล์ กลไกนี้ประกอบด้วย การ efflux ไอออนโลหะหนักออกจากเซลล์ การสะสมโลหะหนักที่เข้าไปภายในเซลล์ การทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักภายในเซลล์ และการ reduction ไอออนโลหะหนักให้มีความเป็นพิษน้อยลง นอกจากนี้กลไกการลดการขนส่งไอออนโลหะหนักเข้าสู่เซลล์ ยังเป็นกลไกที่สำคัญในการทนต่อโลหะหนัก กลไกการสะสมโลหะหนักของแบคทีเรียมีหลายแบบ เช่น การใช้ระบบการขนส่งธาตุอาหารเข้าสู่เซลล์ การจับกับโลหะหนักด้วยโปรตีน (Metal binding protein) ซึ่งมีทั้งแบบที่เกิดขึ้นภายในเซลล์และภายนอกเซลล์ การตกตะกอน (precipitation) การดูดซับไอออนโลหะหนัก (Adsorption) และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโลหะหนัก (Complexation) ซึ่งเกิดขึ้นจากการจับสารเมตาบอลิต์ออกมาจับกับไอออนโลหะหนัก

ขั้นตอนการขนส่งไอออนโลหะหนักเข้าสู่เซลล์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

1. การจับไอออนโลหะหนักไว้ที่ผนังเซลล์ และไอออนโลหะหนักจะถูกส่งผ่านเข้าไปในเซลล์โดยใช้พลังงานซึ่งเป็นวิธีเดียวกับการขนส่งอาหารเข้าสู่เซลล์ กระบวนการขนส่งไอออนโลหะหนักในแบคทีเรียแต่ละชนิดจะมีกลไกที่ไม่เหมือนกันและมีความเฉพาะเจาะจงกับโลหะหนักที่แตกต่างกัน หลังจากไอออนโลหะหนักเข้าสู่ในเซลล์จะไปเป็นส่วนประกอบหนึ่งของเซลล์

2. การตกตะกอนโลหะหนักเป็นการสะสมโลหะหนักโดยแบคทีเรียผลิตหรือปลดปล่อยสารซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะหนักได้ เกิดเป็นสารประกอบโลหะหนักที่ไม่ละลายน้ำ เช่น *Citrobacter sp.* สามารถสร้างเอนไซม์ฟอสฟาเตสมาย่อยกลีเซอรอล 2 ฟอสเฟต แล้วปลดปล่อย HPO_4^{2-} ซึ่งสามารถตกตะกอน แคลเซียม ตะกั่ว ยูเรเนียมได้ การนำเข้าไปของโลหะหนักในแบคทีเรียมี 2 แบบ คือ การนำเข้าแบบเร็วและการนำเข้าแบบช้า โดยการนำเข้าแบบเร็ว จะไม่เฉพาะเจาะจงกับสับสเตรท การนำเข้าแบบนี้สามารถนำเข้าโลหะหนักผ่านทางเยื่อหุ้มเซลล์โดยไม่ต้องอาศัยพลังงาน ATP ส่วนการนำเข้าแบบช้าจะเฉพาะเจาะจงกับสับสเตรท โดยอาศัยพลังงาน ATP จาก ATP hydrolysis

อย่างไรก็ตามการทนต่อโลหะหนักของแบคทีเรียทั้งหมด 5 รูปแบบ คือ การใช้เอนไซม์ จับโลหะหนักที่ผนังเซลล์ การลดการนำเข้า โลหะหนักบางตัวจะมีการแพร่เข้าไปภายในไซโตพลาสซึม และการเปลี่ยนเป้าหมายภายในเซลล์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. โดยการใช้เอนไซม์ออกซิเดส (oxidases) และเอนไซม์รีดักเตส (Reductase) ในการเปลี่ยนไอออนจากโลหะหนักที่เป็นพิษมากเป็นโลหะหนักที่มีพิษน้อยหรือมีเอนไซม์อัลคิลเลตติ้ง (Alkylating) และเอนไซม์ดีอัลคิลเลตติ้ง ไลเอส (Dealkylating lyases) ที่เพิ่มและกำจัดพันธะโควาเลนต์ของสารประกอบที่เป็นโลหะอินทรีย์ สำหรับการรีดักชัน (Reduction) และการดีอัลคิลเลชัน (Realkylation) เป็นกลไกหลักในการต้านทานสารประกอบอินทรีย์หรืออนินทรีย์ของปรอท ส่วนอะเซนิคใช้กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) และโครเมตใช้กระบวนการรีดักชัน (reduction) เป็นกลไกการต้านทานไอออนโลหะหนักของแบคทีเรีย

2. โดยการใช้การจับโลหะหนักที่ผนังเซลล์หรือภายในเซลล์โดยใช้สารประกอบที่มีความเฉพาะเจาะจงในการจับ เช่น Methallothionin และ Metallopeptides

3. โดยการลดการนำเข้า (Reduce uptake) โลหะหนัก วิธีนี้เซลล์ของแบคทีเรียจะขัดขวางการนำเข้าโลหะหนักโดยเปลี่ยนเส้นทางนำเข้าในเซลล์ที่มีความไวต่อโลหะหนัก (Sensitive cell) เช่น การต้านทานอะเซเนต แคลเซียม โครเมต และไอออนของโลหะอื่นบางตัว

4. ไอออนของโลหะหนักบางตัวจะมีการแพร่เข้าไปภายในไซโตพลาสซึมแบคทีเรียสามารถขับไอออนโลหะหนักออกโดยการปั๊มออกจากเซลล์ด้วยระบบการขนส่ง (Transport

system) โดยใช้กระบวนการ Highly specific efflux system โดยอาศัยพลังงานจากเยื่อหุ้มเซลล์ หรือจาก ATP โดยตรง สำหรับ Efflux pump เป็นกลไกสำหรับใช้ต้านทานยาปฏิชีวนะกลุ่ม เตตราไซคลินและสามารถใช้กับดลหะหนัก เช่น อาเซนิก แคดเมียม และโครเมต

5. โดยการเปลี่ยนเป้าหมายภายในเซลล์สำหรับทำปฏิกิริยากัลป์โลหะหนักที่เป็นพิษ กลไกการต้านทานแบบนี้จะไม่เฉพาะเจาะจง ต้องมีการเปลี่ยน Thiol-containing enzyme เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของโลหะหนัก

นอกจากกระบวนการการขนส่งไอออนโลหะหนักเข้าสู่เซลล์ และการทนต่อโลหะหนัก ของแบคทีเรีย แล้วนั้นแบคทีเรียยังสามารถกำจัดโลหะหนัก ที่เป็นพิษหรือมีอยู่ในปริมาณที่มากเกินไป ความต้องการของเซลล์ ได้ กระบวนดังกล่าวอยู่ได้ในรูปแบบของการใช้พลังงานและไม่ใช้ พลังงาน สามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

1. การกำจัดโลหะหนักของแบคทีเรียโดยใช้พลังงาน

1.1 การตกตะกอนโดยแบคทีเรีย (precipitation) แบคทีเรียจะปล่อยสารเพื่อทำ ปฏิกิริยากับโลหะหนักเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ เช่น การผลิตไฮโดรเจนซัลไฟด์ (sulfate reducing bacteria) แล้วทำให้เกิดสารประกอบโลหะซัลไฟด์ ดังที่ *Citrobacter* สร้างเอนไซม์ ฟอสฟาเตสย่อยกลีเซอรอล -2-ฟอสเฟต แล้วปล่อย HPO_4^{2-} ซึ่งจะตกตะกอนแคดเมียม ตะกั่ว และยูเรเนียมได้

1.2 การสะสมโลหะหนักภายในเซลล์ (Intracellular bioaccumulation) โดยจับโลหะ หนักไว้ที่ผนังเซลล์ และส่งผ่านเข้าไปในเซลล์โดยใช้พลังงานที่เป็นกระบวนการเดียวกับ แมกนีเซียม โปรแตสเซียมบีม

1.3 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน เช่น *Bacillus* sp. สามารถออกซิไดซ์แมงกานีสเป็น แมงกานีสออกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำได้ หรือ เพอริกไอออนเป็นเฟอร์รัสได้ ($\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+}$)

1.4 การเติมหมู่เมทิล (methylation) สามารถเปลี่ยนโลหะหนักบางชนิดที่อยู่ในน้ำ และในดินไปสู่อากาศได้ และการกำจัดหมู่เมทิล (demethylation) ทำให้เกิดสารประกอบ โลหะอินทรีย์ที่เป็นรูปที่จุลินทรีย์อื่นสามารถเปลี่ยนรูปต่อไปได้

2. การกำจัดโลหะหนักของแบคทีเรียโดยไม่ใช้พลังงาน

2.1 การจับโลหะหนักปล่อยออกนอกเซลล์ แบคทีเรียจะผลิตสารที่สามารถจับโลหะได้ (chelating agent) ซิเดอโรฟออร์ (siderophores) และโพลีเมอร์ที่ประกอบด้วย โพลีแซคคาไรด์ โปรตีน และกรดนิวคลีอิก ซึ่งสามารถจับไอออนโลหะหนักได้

2.2 การกำจัดโลหะหนักโดยผนังเซลล์ โดยการแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) การตกตะกอน (precipitation) และการเกิด complexation ซึ่งผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวก

เช่น Bacillus สามารถจับกับโลหะหนักได้ดี เนื่องจากเป็นร่างแหเปปติโดไกลแคน (peptidoglycan) ที่หนาและจับกับโมเลกุลขนาดใหญ่บางชนิด บางชนิดประกอบด้วยกรดไทโคอิก (teichoic acid) กรดไทคูโรนิก (teichuronic acid) ซึ่งทำให้ผนังเซลล์เป็นประจุลบ และพันธะฟอสโฟไดเอสเทอร์ (phosphodiester bond) ของกรด 2 ชนิดนี้ จะให้หมู่คาร์บอกซิลจึงเกิดการแลกเปลี่ยนประจุที่ผนังเซลล์ได้ ที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมลบไม่สามารถจับกับโลหะหนักได้เพราะมีผนังเปปติโดไกลแคนที่บาง

ประสิทธิภาพของการกำจัดโลหะหนักนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่แบคทีเรียกำจัดโลหะหนัก โดยการกำจัดโลหะหนักของแบคทีเรียสามารถเกิดขึ้นได้ในบริเวณต่าง ๆ ของเซลล์ ดังนี้

1. การสะสมโลหะหนักภายในเซลล์ ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การจับกับโลหะหนักไว้ที่ผนังเซลล์ จากนั้นโลหะหนักจะถูกส่งผ่านเข้าไปภายในเซลล์โดยใช้พลังงาน ซึ่งเป็นวิธีเดียวกับการขนส่งแมกนีเซียมและโปแตสเซียมข้ามเยื่อหุ้มเซลล์ จุลินทรีย์กำจัดโลหะหนักเข้าไปสะสมภายในเซลล์โดยอาศัยการขนส่ง 3 รูปแบบ คือ การแพร่แบบธรรมดา (Diffusion) การแพร่แบบ Facilitated diffusion และกระบวนการ Active transport เป็นการขนส่งไอออนหรือสารผ่านเยื่อหุ้มเซลล์โดยอาศัยพลังงาน ทั้งนี้โลหะหนักสามารถสะสมในจุลินทรีย์ได้จากกระบวนการแพร่และกระบวนการ active transport แต่การสะสมภายในเซลล์จะเกิดขึ้นได้ยากเพราะต้องขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ หลายประการ เช่นสภาพแวดล้อม ความจำเพาะของสารที่จะส่งผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ สภาพสรีรวิทยาของอัตราเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ ซึ่งถ้าอยู่ในระดับต่ำเซลล์จะมีพลังงานไม่พอที่จะใช้ในกระบวนการแยกที่พทรานสปอร์ต เพื่อนำสารเข้าสู่เซลล์ได้

2. การสะสมโลหะหนักภายในเซลล์ (intracellular bioaccumulation) การสะสมโลหะหนักของแบคทีเรีย มี 2 กระบวนการ คือ การจับโลหะหนักไว้ที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรีย จากนั้นโลหะหนักจะถูกส่งผ่านเข้าไปสู่ภายในเซลล์โดยใช้พลังงานซึ่งเป็นกระบวนการเดียวกับการขนส่งแมกนีเซียมโปแตสเซียมข้ามเยื่อหุ้มเซลล์

3. การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชัน เช่น การรีดิวซ์เฟอริกไอออน (Fe^{3+}) เป็นเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการขนถ่ายอิเล็กตรอนของแบคทีเรีย

4. การเติมหมู่เมทิล (methylation) และการกำจัดหมู่เมทิล (demethylation) เป็นกระบวนการที่แบคทีเรียใช้ในการเปลี่ยนรูปโลหะหนักในสภาพแวดล้อม การเติมหมู่เมทิลสามารถเปลี่ยนรูปโลหะหนักบางชนิดที่อยู่ในน้ำและดินไปสู่บรรยากาศได้ ส่วนการกำจัดหมู่เมทิลทำให้เกิดสารประกอบโลหะ อนินทรีย์ขึ้น ซึ่งเป็นรูปที่จุลินทรีย์ชนิดอื่นสามารถเปลี่ยนรูปต่อไปอีกได้

5. การสะสมโลหะหนักภายนอกเซลล์ โดยแบคทีเรียจะกำจัดโลหะหนักจากสารละลายไว้ที่ผนังเซลล์ ทั้งนี้โลหะหนักสามารถสะสมและตกตะกอนได้ที่ผนังเซลล์ การกำจัดโลหะหนักเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางเคมี และโครงสร้างภายในเซลล์จุลินทรีย์โดยมีการเชื่อมกันบางส่วนของโลหะหนักกับบริเวณผิวที่ถูกกำจัด กระบวนการกำจัดที่เกิดที่ผิวเซลล์สามารถเกิดได้ทั้งในชีวมวลที่ไม่มีชีวิต หรือชีวมวลที่มีชีวิต

แบคทีเรีย รา และสาหร่ายมีโครงสร้างผนังเซลล์ที่แตกต่างกัน ผนังเซลล์ของแบคทีเรีย รา และสาหร่ายประกอบด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่ มีความซับซ้อน ผนังเซลล์ของยีสต์และรา ประกอบด้วย โพลีแซคคาไรด์ กาแลคโตซามีน ไคติน โปรตีน และไขมัน ส่วนผนังเซลล์ของสาหร่ายจะประกอบด้วยเซลลูโลสและสารพวกเจลลาติน ส่วนผนังเซลล์ของแบคทีเรียประกอบด้วยมิวโคโพลีแซคคาไรด์ และเปปติโดไกลแคน โดยจะมีปริมาณมากในแบคทีเรียแกรมบวก ซึ่งส่วนมากจะมีไทโคอิก แอซิด ในแบคทีเรียแกรมลบจะมีลิโปโพลีแซคคาไรด์ ไขมัน โปรตีน เป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ซึ่งเรียงตัวกันอยู่เหนือชั้น เปปติโดไกลแคน ผนังเซลล์แบคทีเรียจะแสดงไอออนลบกับสภาพแวดล้อมโดยรอบเนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิล หมู่ไฮดรอกซิล หมู่ซัลเฟตและหมู่ฟอสเฟต ซึ่งสามารถเกิดแรงกระทำกับพวกที่ไม่มีประจุในผนังเซลล์และทำหน้าที่เป็นลิแกนด์ เพื่อความสมบูรณ์ของจำนวนเลขโคออดิเนชัน ของไอออนบวกของโลหะหนัก เช่น อะตอมไฮโดรเจนในพันธะเปปไทด์

6. การจับโลหะหนักโดยสารที่แบคทีเรียปล่อยออกสู่ภายนอกเซลล์ เกิดขึ้นโดยการผลิตสารเมตาบอไลต์ แล้วจับออกนอกเซลล์เพื่อสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนัก ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายลดลงได้ ความหลากหลายของโพลีเมอร์ชีวภาพที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้นมา มีความสามารถในการจับโลหะได้แตกต่างกัน โพลีเมอร์ชีวภาพ ได้แก่ โพลีแซคคาไรด์ โปรตีน และโพลีอินอล รวมทั้งโพลีเมอร์อื่น ๆ ที่มีความสัมพันธ์กัน โดยโลหะอาจเกิดแรงกระทำแบบไอออนนิกกับประจุลบของโพลีเมอร์ชีวภาพที่ทำปฏิกิริยากับโลหะ เช่น หมู่ไทออล (-SH) โดยซัลเฟอร์จะเป็นอะตอมผู้ให้ ความสามารถในการละลายของโพลีเมอร์ชีวภาพจะแปรผันตามน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์ ชนิดของโพลีเมอร์และสภาพแวดล้อม โพลีแซคคาไรด์จะประกอบไปด้วย โมโนเมอร์เบตา 1-4 กลูโคส ซึ่งเรียกว่า โมโนแซคคาไรด์ซึ่งพบได้ทั้งพืช สัตว์ รวมทั้งจุลินทรีย์ มีความแตกต่างกันที่สำคัญของโพลีแซคคาไรด์ ที่ถูกสร้างโดยจุลินทรีย์คือ แบคทีเรียอาจสร้างโพลีเมอร์ออกมาภายนอกอย่างไม่แน่นอนโดยยึดเหนี่ยวกับผนังเซลล์หรืออาจสร้างชั้นเจลลาติน หรือแคปซูลออกมาล้อมผนังเซลล์ก็ได้ ซึ่งโพลีเมอร์ที่มีสภาพเป็นกรดที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นมาจะมีสภาพเป็นไฮโดรฟิลิก และมีขั้วซึ่งสามารถจับกับโลหะได้ดี ซึ่งโพลีเมอร์จะประกอบด้วย เพนโตส เฮกโซส เฮปโตส น้ำตาลอะมิโน กรดเฮกซูโรอิก ขึ้นอยู่

กับสายพันธุ์ของแบคทีเรีย ทั้งนี้โพลีเมอร์ไม่เพียงแต่จับโลหะหนักเท่านั้นแต่สามารถล้อมรอบอนุภาคโลหะหนักที่ไม่ละลายน้ำได้ด้วย

ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักของแบคทีเรีย

นอกจากคุณสมบัติของแบคทีเรีย อาหาร แล้วสภาพแวดล้อมที่แบคทีเรียชนิดนั้น ๆ อาศัยอยู่รวมทั้ง ลักษณะทางกายภาพและเคมีของสิ่งแวดล้อมยังส่งผลต่อการกำจัดโลหะหนักของแบคทีเรีย ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง สภาพรีดอกซ์ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการกำจัดชนิดและความเข้มข้นของโลหะ ล้วนแต่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักทั้งสิ้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. กรด-ด่าง

กรด-ด่าง เป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมการเคลื่อนที่ของธาตุอาหารหรือมลพิษในดินเมื่อดินอยู่ในสภาพที่เป็นกรด ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในดินจะมีการแข่งขันกับโลหะหนักในดิน ส่งผลให้ในดินมีความสามารถในการดูดซับแคตไอออน (โลหะ) ต่ำลง และยังเป็น การเพิ่มการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก แต่ในสภาพที่เป็นกรดการจับกับโลหะหนักของแบคทีเรีย จะถูกจำกัดโดยการเพิ่มขึ้นของโปรตอนที่มาแย่งจับกับ anion binding site และการเพิ่ม พีเอช จะทำให้ประจุลบบริเวณผิวหน้าของเซลล์แบคทีเรียเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด ดีขึ้น ในแบคทีเรียพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักอยู่ที่พีเอช 4-7

2. สภาพรีดอกซ์

รูปและพฤติกรรมของธาตุหลายชนิดในระบบดินถูกควบคุมด้วยสภาพรีดอกซ์ (ออกซิเดชัน -รีดักชัน) หรือพฤติกรรมของธาตุถูกควบคุมโดยสภาพการระบายน้ำของดิน ดินที่มีการระบายอากาศดีจะเกิดกระบวนการออกซิเดชัน ดินที่มีการระบายอากาศเลวจะเกิด กระบวนการรีดักชัน โลหะหนักบางชนิด เช่น แคดเมียม สังกะสี และปรอท มีสภาพ การเคลื่อนที่ปานกลางในสภาวะออกซิเดชัน แต่ในสภาวะรีดักชันธาตุเหล่านี้จะมีการละลายต่ำ หรือไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ เนื่องจากมีการรวมตัวกับ ซัลเฟอร์ (S) เกิดเป็นแร่ที่มีความ เสถียรมากกว่าในสภาพออกซิเดชัน

3. อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่มีผลต่อการสะสมของเมตาบอลิก โดยที่อุณหภูมิต่ำ 0-5 องศาเซลเซียส โลหะหนักจะถูกแยกออกด้วยกระบวนการเมตาบอลิก โดยจะมีผลต่อแบคทีเรียที่ต้อง อาศัยพลังงาน แต่ไม่มีผลต่อแบคทีเรียที่ไม่อาศัยพลังงาน อุณหภูมิที่เหมาะสมในการกำจัด เมตาบอลิกอยู่ที่ 25-35 องศาเซลเซียส

4. ระยะเวลาในการกำจัด

จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะใช้เวลาในการกำจัดโลหะหนักที่แตกต่างกัน ซึ่งระยะแรกจะกำจัดแคดเมียมโดยไม้อาศัยพลังงานแต่เป็นระยะเวลาเพียงช่วงสั้นๆ ระยะที่ 2 คือ การกำจัดเข้าสู่เซลล์โดยอาศัยพลังงานจึงเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ แต่ทั้งนี้ทั้ง 2 ระยะเวลาจะผันแปรตามความเข้มข้นของแคดเมียม ถ้าความเข้มข้นสูงแคดเมียมจะจับกับผนังเซลล์ได้เร็วขึ้นทำให้ใช้เวลาน้อยลง

5. ชนิดและความเข้มข้นของโลหะ

การกำจัดโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นในระยะแรกเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นแต่เมื่อถึงจุดคงที่การกำจัดจะลดลงเนื่องจากเซลล์แบคทีเรียไม่เหลือพื้นที่ในการกำจัด

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สถานการณ์ปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นมลพิษทางน้ำ อากาศ ปัญหาด้านการจัดการขยะ และมลพิษทางดิน ซึ่งมีสาเหตุหรือมีผลกระทบต่อการใช้ชีวิตประจำวัน หรือการประกอบอาชีพเกษตรกร ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี ยาฆ่าแมลงหรือแม้แต่สารปราบศัตรูพืช ล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อดิน ดังที่สมพร เรืองศรี (2556) พบว่าความหนาแน่นของการจรรยาจรรยาส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักสู่ดินและพื้นที่การเกษตรกรรม โดยพบการปนเปื้อนของสังกะสี (Zn) ตะกั่ว(Pb) แคดเมียม(Cd) ทองแดง(Cu)ปรอท(Hg) สารหนู(As) และนิกเกิล (Ni) ในผักทุกชนิดแต่อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการบริโภค ซึ่งผักกาดขาวปลี ผักกาดเขียววงตุ้งผัก คื่นช่าย และผักบุ้ง มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมและตะกั่วสูงกว่าค่ามาตรฐานอาหารสากล (Codex) ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักสด นอกจากนี้ไม่ว่าจะเป็นโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยน้ำเสียหรือโรงงานถลุงแร่ต่าง ๆ ยังก่อให้เกิดการปนเปื้อนในดินดังเช่นปัญหาการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินที่ตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก จึงมีการศึกษาและหาแนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าว เช่น Saengdao Khaokaw (2010) พบว่าภายใต้การระบายน้ำที่แตกต่างกันในพื้นที่ดินนา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก แคดเมียมในนาที่มีความเป็นด่างถูกปลดปล่อยมาน้อยที่สุด 14 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่ง $CdCO_3$ คือ รูปของแคดเมียมในดินแม่สอด นอกจากนี้ CdS ที่เป็นแคดเมียมที่พบในน้ำขังทั่วไป เมื่อปรับสภาพดินให้เป็นกรด ทำให้แคดเมียมปล่อยออกมามากขึ้น เนื่องจากเป็นการชะลอการเกิดสภาพรีดักชันภายใต้สภาพน้ำขัง จึงสามารถป้องกันไม่ให้ Cd จับกับ S เกิดเป็น CdS ที่อยู่ในรูปเสถียรและมีสภาพการละลายต่ำ

จากการศึกษาดังกล่าวทั้งนี้เพื่อลดการสะสมของแคดเมียมในดิน และลดปริมาณแคดเมียมที่สะสมในพืชจึงมีการสำรวจเก็บตัวอย่างเมล็ดข้าวในจังหวัดสุพรรณบุรี ราชบุรี

เพชรบุรี กำแพงเพชร พิษณุโลก และนครสวรรค์ พบว่า ปริมาณแคดเมียมที่ตรวจพบในเมล็ดข้าวมีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 0.01–0.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ Codex ที่กำหนดไว้ 0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีปริมาณตะกั่วปนเปื้อนในเมล็ดข้าวในช่วง 0.17–0.51 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่ามากกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่อนุญาตให้พึงมีในข้าวของ Codex โดย ปริมาณตะกั่วในตัวอย่างเมล็ดข้าวที่เก็บจากจังหวัดเพชรบุรี นครสวรรค์ กำแพงเพชร พิษณุโลก มีค่าเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ร้อยละ 60.6 ,13.4,11.8,8.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ วนิดา โนบรรเทา และคณะ (มปป) และธนภัทร ปลื้มพวง และคณะ (2558) พบการสะสมแคดเมียมในผลผลิตข้าวพบปริมาณแคดเมียมสูงกว่าค่ามาตรฐาน Codex (0.2 มก./กก.) และการปนเปื้อนแคดเมียมที่ละลายน้ำได้สูงสุดคือ 0.92 มก./กก. และที่สามารถสกัดได้ 46.87 มก./กก. ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานของสหภาพยุโรปที่กำหนดไว้ว่าในดินไม่ควรจะมีปริมาณแคดเมียมเกิน 1 มก./กก. และปริมาณแคดเมียมที่พบในครั้งนี้ไม่ได้ลดลงไปจากเดิมกับปริมาณแคดเมียมที่พบในปี 2543–2547

กัญญ์กุลณัช คำปวง และคณะ (2559) ศึกษาการตอบสนองของผลผลิตในข้าว 3 พันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีปริมาณแคดเมียมแตกต่างกัน พบว่าการปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในดินที่ใส่แคดเมียม 5 mg/kg มีผลผลิตไม่แตกต่างกันจากในดินที่ใส่แคดเมียม แต่ที่ระดับแคดเมียม 100 และ 200 mg/kg ทำให้ผลผลิตเมล็ดลดลงร้อยละ 42.08 และ 84.35 ตามลำดับ เปรียบเทียบกับผลผลิตเมล็ดที่ปลูกในที่ไม่ใส่แคดเมียม และ ส่งผลให้น้ำหนักฟางเพิ่มขึ้นร้อยละ 34.22 และ 59.24 ตามลำดับ โดยผลผลิตและน้ำหนักฟางมีความสัมพันธ์ในเชิงลบที่ $r=-0.86$ ซึ่งส่งผลต่อดัชนีการเก็บเกี่ยวของข้าว

ธนภัทร ปลื้มพวง และคณะ (2557) ศึกษาปริมาณแคดเมียมในข้าวที่ปลูกในดินนาปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่ ลุ่มน้ำแม่ตาว จังหวัดตาก ประเทศไทย อธิบายว่าปริมาณแคดเมียมในดินไม่ส่งผลต่อความสูงของข้าว ลำต้น และใบไม่แสดงอาการผิดปกติเมื่อสังเกตด้วยสายตา ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในลำต้น และใบข้าว สามารถบ่งชี้ถึงความเสี่ยงต่อความเป็นพิษของแคดเมียมต่อข้าวที่จะส่งผลให้ผลผลิตข้าวลดลง 40 % ทั้งนี้ การดึงดูดแคดเมียมจะลดลงเมื่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินเพิ่ม โดยปริมาณอินทรีย์วัตถุที่สูงในดินจะช่วยลดแคดเมียมในดินได้ เนื่องจากอินทรีย์วัตถุสามารถจับยึดแคดเมียมได้ดี จึงทำให้แคดเมียมจับยึดกับอินทรีย์ในดินมากขึ้นและพืชจะดึงดูดแคดเมียมน้อยลง

นอกจากนี้ยังมีการประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนักในการปลูกหอมแดง ในพื้นที่จังหวัดอุดรธานี พบว่าปุ๋ยเคมีที่เกษตรกรใช้ได้แก่ ปุ๋ยเคมีสูตร 8-24-24, 46-0-0 และ 16-16-16 ซึ่งพบมีการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนัก คือ แคดเมียม ตะกั่ว ทองแดง สังกะสี เหล็ก

และแมงกานีส โดยมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดินของกรมพัฒนาที่ดิน ยกเว้นแคดเมียม ที่เกินมาตรฐานในทุกจุดเก็บตัวอย่าง (อารีย์ สุตรอุตม และคณะ, 2556) ประกอบกับ สุขญาณกิจ และธนวรรณ พาณิชพัฒน์ (2556) พบว่าการปนเปื้อนและการสะสมของตะกั่วในทานตะวัน และข้าวฟ่างมีการสะสมสูงสุดบริเวณราก รองลงมา คือ ลำต้น ใบ ดอก เปลือก และเมล็ด ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการสะสมของตะกั่วในเมล็ดทานตะวันและข้าวฟ่างมีปริมาณความเข้มข้นเกินกว่าค่ามาตรฐานเพื่อบริโภคเป็นอาหารมนุษย์ แต่ไม่เกินค่ามาตรฐานของอาหารสัตว์ และ อารีย์ สุตรอุตม, มินตรา สุมาลี และปิยะดา วชิระวงศกร. (2556) ได้ประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนัก ในการปลูกหอมแดง พบว่ามีปริมาณแคดเมียม ตะกั่วในดินระยะก่อนปลูกและหลังปลูกมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดินของกรมพัฒนาที่ดิน ปริมาณการปนเปื้อนของโลหะหนัก แคดเมียม ตะกั่ว สังกะสี ในหอมแดงมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานอาหารปลอดภัยแห่งชาติ สาธารณรัฐประชาชนจีน

ซึ่งปัจจุบันมีรายงานการวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดมลพิษทางชีวภาพโดยแบคทีเรีย ที่พบว่าแบคทีเรียสามารถลดการปนเปื้อนของสารพิษในดินได้ ดังรายงานดังต่อไปนี้

จากการศึกษาของจูไรรัตน์ อิมินา (2557) ด้านการย่อยสลายสารไกลโฟเสททางชีวภาพ ของแบคทีเรียที่แยกได้จากดินในพื้นที่เพาะปลูก พบแบคทีเรียในกลุ่ม *Bacillus* เป็นกลุ่มที่ต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโต (aerobic bacteria) สามารถเจริญได้ดีที่อุณหภูมิต่ำจนถึงอุณหภูมิสูง และเจริญได้ดีในสภาวะที่มีพีเอช 2-11 ได้แก่ *Bacillus megaterium* *Bacillus subtilis* และ *Bacillus cereus* จากการทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายสารไกลโฟเสทความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า *Bacillus subtilis* และ *Bacillus cereus* มีประสิทธิภาพในการย่อย 98.84% และ 98.46% ตามลำดับ ส่วน *Bacillus megaterium* มีประสิทธิภาพในการย่อย 85.94%

ทั้งนี้เนื่องมาจากจุลินทรีย์ หรือแบคทีเรีย มีความจำเพาะและสามารถยับยั้งหรือกำจัดโลหะหนักบางชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพดังการศึกษาของ Bhoopesh (2010) ที่ได้ศึกษาการ adsorp Cd ของ *B.subtilis* และ *shewanella oneidensis* ที่ pH 5.9 โดยการควบคุม biomass ของแบคทีเรียให้คงที่ ซึ่งพบว่าการตอบสนองของ Cd sorption ใน bacterial ทั้ง 2 ชนิด ต่อ Cd loadings tested (1-200 ppm) พบว่า แบคทีเรียทั้ง 2 มี cell wall ที่จำเพาะต่อ Cd คือ มี carboxyl and the phosphoryl sites โดยสามารถ adsorp ได้มากที่สุด 100-200 ppm ต่ำสุด 1 ppm for *B.subtilis* and 3 ppm for *S. Oneidensis* ประกอบกับ Anoop (1997) ทำการทดสอบความสามารถ *Aspergillus* ในการกำจัด Pb Cd และ Cu ใน solution ได้ด้วย infrared spectroscopy พบว่าการทำงานของ functional group ใน cell wall ได้แก่ carboxyl group amino group และ phosphate group พบว่า ถ้า carboxyl group และ methylation ของ amino group จะทำให้การดูดซับโลหะลดลง ส่วน phosphate group และ

lipid เป็นส่วนสำคัญในการเพิ่ม biomass ไม่มีเกี่ยวข้องกับกับการดูดซับโลหะหนัก แสดงว่าผลจากการดูดซับโลหะหนักเป็นผลจาก ion exchange process จึงไปในทิศทางเดียวกันที่ Sanjukta (2016) ได้ ทดสอบเลี้ยง *Achromobacter* ในอาหารที่มี โลหะหนัก Zn^{2+} (1250 mg L/1), Cd^{2+} (2.0 mg L/1), Pb^{2+} (30 mg L/1), Cu^{2+} (90 mg L/1), and Ni^{2+} (200 mg L/1) หลังจากนั้นติดตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น พบว่าพบหลังจาก 5 วันมี pH เพิ่มขึ้น สูงสุดที่ 7.68 ทำให้กิจกรรมการย่อยลดลง 83.3 % เป็น 73.8% และ Todorova (2008) ศึกษาการตอบสนองของ *Aspergillus* ภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของ Cd ต่างกัน, ที่ส่งผลต่อ จำนวน cell การสังเคราะห์โปรตีน กิจกรรมของ cell ที่ส่งผลต่อการใช้โลหะหนัก พบว่า ความทนทานต่อสภาวะที่มี Cd มีความสัมพันธ์ต่อการ uptake โลหะหนัก ในสภาวะที่มี ออกซิเจน หลังจาก 18 ชม พบว่า *Aspergillus* สามารถทนต่อสภาวะที่มี Cd เข้มข้น ต่ำสุด 10 mg/L และมากที่สุด 70 mg/L และพบว่าในสภาวะที่มี Cd ปริมาณมากทำให้เกิด stress ส่งผลให้กระตุ้น antioxidant enzyme ใน *Aspergillus* Xiaoyan Lin et al (2016) พบว่า Cd resisting bacterial มีความสามารถในการยับยั้งการนำแคดเมียมเข้าสู่รากพืช และลดความเป็นพิษของแคดเมียมต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยการเพิ่มจำนวน binding site บน cell surface

Soumik Mitra et al., (2018) การสะสมของแคดเมียมโดย *Enterobacter* sp. และการเจริญเติบโตของข้าวภายใต้ความเครียดของแคดเมียม พบว่าภายใต้สภาวะที่มีแคดเมียมจะไปยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสง ได้แก่ คลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ส่งผลต่อผลผลิตและการเจริญของพืช ในการทดลองที่มีการใช้แบคทีเรียส่งผลให้คลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่ใช้แบคทีเรีย แคดเมียมมีผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์และกระบวนการสังเคราะห์แสงลดลง เนื่องจากแคดเมียมทำให้น้ำตาลไรโบโลสฟอสเฟตและเอมไซม์ไรโบโลสฟอสเฟตคาร์บอกซิเลสลดลง ส่งผลให้กระบวนการสังเคราะห์แสงลดลง

Tossapol Limcharoensuk et al., (2015) แยกไอโซเลทของแบคทีเรียจากดินและพบว่า *P.aeruginosa* มีความทนต่อแคดเมียมและสังกะสี โดยมีค่า MIC เท่ากับ 1,467 mg/L และ Zn เท่ากับ 2,590 mg/L

Farheen Nazli et al., (2020) *Bacillus safensis* เป็น rhizobacteria ที่สร้าง indole 3 acetic acid (IAA) พบว่าสามารถทนต่อแคดเมียม และสร้าง exopolysaccharides (EPS) ที่มีความสำคัญต่อ plant growth promoting (PGP) โดยความเข้มข้นของแคดเมียมในระดับต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ (MIC) มีค่าระหว่าง 1,400–1,500 $\mu\text{g/ml}$

Ratan singh et al., (2015) พบว่า *Bacillus safensis* สามารถเจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อและมีความเข้มข้นของแคดเมียมในระดับต่ำสุด ที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ (MIC) มีค่าเท่ากับ 100 mg/kg และมี%removal ระหว่าง 17.76–54.17 %

Jitendra Mishra et al., (2017) อธิบายกลไกการลดปริมาณปนเปื้อนโลหะหนัก (Cd, Cu, Pb และ Zn) ของจุลินทรีย์ว่าเป็น Heavy metal tolerant plant growth promoting (HMT-PGP) โดยจุลินทรีย์บริเวณรากพืชจะดึงดูดโลหะหนัก และปล่อยโปรตอน (H^+) ร่วมกับกรดอินทรีย์ เพื่อเปลี่ยนรูปของโลหะหนักที่ไม่ละลายน้ำ ให้อยู่ในรูปที่สามารถละลายน้ำได้ จากนั้นจะถูกจับไว้ด้วย Metal binding proteins (MBP) ที่ผนังเซลล์เป็น Protein metal complex (PMC) ซึ่ง MBP ประกอบด้วย metallothionines, (กลุ่มโปรตีนที่มีกรดอะมิโนซิสเทอีนสามารถจับกับโลหะหนัก เช่น แคดเมียม ปรอท เงิน สารหนูได้ดีด้วยหมู่ไซโออลท) phytochelatins (ยีนที่มีส่วนสำคัญต่อการสะสมและทนต่อโลหะหนักแคดเมียม) และ siderophores (สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กที่แบคทีเรียสร้างและปล่อยออกมา) เพื่อช่วยในการจับโลหะหนักจากภายนอกเข้าสู่ภายในเซลล์แบบ active transport ซึ่งนำโลหะหนักไปใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ของแบคทีเรีย ทั้งการเจริญ การเพิ่มจำนวนและเมแทบอลิซึม การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ Heavy metal tolerant plant growth promoting (HMT-PGP) โดยจุลินทรีย์ คือ การเปลี่ยนรูปของโลหะหนักจากอินทรีย์ให้เป็นอินทรีย์ทำให้อยู่ในรูปที่เป็นพิษน้อยลงพืชจึงสามารถนำเข้าสู่เซลล์ได้ จากนั้นจุลินทรีย์จะปล่อยสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช เช่น IAA, ACC deaminase ,siderophores บริเวณรากพืชโดยพืชขนส่งโลหะหนักและสะสมในส่วนต่าง ๆ Metal Binding Protein (MBP) ที่ผนังเซลล์ จับกับโลหะหนัก เป็น LMW-MBP metal complex และขนส่งเข้าสู่เวกคิวโอล โดยโปรตีน ABC transporter และ แลกเปลี่ยน H^+ โดย CAX transporter รวมเป็น HMW-MBP-metal complex เพื่อเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์แสง และปลดปล่อยโลหะหนักในรูปของสารระเหยได้ (volatile From)

การเปรียบเทียบผลจากการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพบางประการของดินในระบบการปลูกผักอินทรีย์ โดย วาสนา วิรุณรัตน์ และคณะ (2557) พบว่าการใช้ปุ๋ยอินทรีย์อย่างต่อเนื่องในระยะเวลา 1 ปี ส่งผลต่อดินหลังปลูก คือ ความเป็นกรดต่าง อินทรีย์วัตถุ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ความชื้นในดินเพิ่มขึ้นและความหนาแน่นของดินลดลง

Quan Zhang et al., (2018) ศึกษาการอิทธิพลของปูนขาวต่อการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าวผ่าน iron-reducing bacteria พบว่า แคดเมียมจะสะสมในผนังเซลล์ของรากข้าว แต่ในสภาวะที่เป็นต่างปริมาณแคดเมียมในผนังเซลล์จะมีค่าน้อยที่สุด และ แบคทีเรียที่พบในดิน

เช่น Proteobacteria Acidobacteria Firmicutes Actinobacteria และ Euryarchaeota มีความสามารถในการลดการ Oxidized โลหะหนักภายใต้ สภาวะ anaerobic facultative anaerobic.

Wuana, R. A. et al., (2010) เตรียมดินปนเปื้อนสังเคราะห์ โดยการเติมแคดเมียมไนเตรท ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) มีอัตราส่วนผสมดิน:สารละลายเท่ากับ 10:1 (ระดับการปนเปื้อนในดิน 500 mg/kg) จากนั้นย่อยดินด้วย Citric Acid Citric Acid และ Citric Acid และหาปริมาณโลหะหนักในดิน พบว่ามีปริมาณแคดเมียมในดิน เท่ากับ 130.60, 65.70 และ 65.70 ตามลำดับ

ทั้งนี้ Wang Feijuan et al., (2018) กลไกการขนส่งแคดเมียมในต้นข้าว แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ

1. แคดเมียมเข้าสู่รากพืชโดย transport protein ซึ่งเป็น transport protein ที่สามารถขนส่งโลหะหนักจำพวก Mn, Fe และ Zn ได้เช่นเดียวกัน
2. การขนส่งแคดเมียมได้รับอิทธิพลจาก Cd chelation และ การแบ่งตัวของ vacuole เนื่องจากความเป็นพิษของแคดเมียม พืชจึงปรับกลไกเพื่อลดการสะสมของแคดเมียมผ่านเส้นทางต่าง ๆ
3. แคดเมียมถูกขนส่งจากรากถึงยอดตามความยาวของไซเลม
4. แคดเมียมถูกขนส่งจากยอดถึงเมล็ด ซึ่งแคดเมียมที่สะสมในเมล็ดจะส่งผ่าน phloem



บทที่ 3

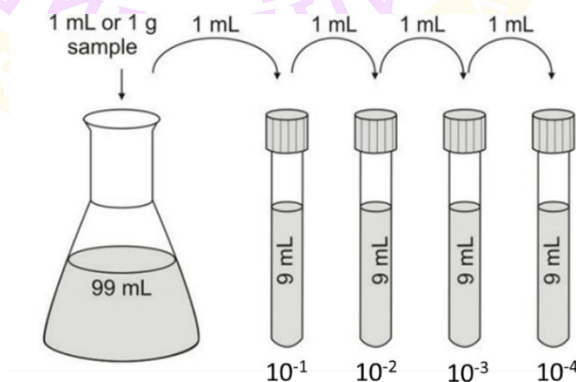
วิธีดำเนินการวิจัย

การประยุกต์ใช้สารชีวภัณฑ์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดินและลดการปนเปื้อนของแคดเมียมในนาข้าวผู้วิจัยได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 การทดลอง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารชีวภัณฑ์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดิน และข้าว และศึกษาประสิทธิภาพของสารชีวภัณฑ์ต่อความเข้มข้นของแคดเมียม โดยออกแบบการศึกษาวิจัยดังนี้

การศึกษาคความทนทานของจุลินทรีย์ในสารชีวภัณฑ์ต่อความเข้มข้นของแคดเมียม

สารชีวภัณฑ์ที่ใช้ทดสอบเป็นสารชีวภัณฑ์จากจุลินทรีย์ ได้แก่ *Achromobacter* sp., *Azotobacter* sp., *Bacillus* sp. และ *Nitrobacter* sp. โดยมีความเข้มข้นของจุลินทรีย์ เท่ากับ 1.0×10^7 cell/gram (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2556)

1. การตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นของสารชีวภัณฑ์
 - 1.1 การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)
 - 1.2 การวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC)
2. การทดสอบการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหารเหลวที่มีแคดเมียม
 - 2.1 นำสารชีวภัณฑ์โดยทำการเจือจาง (Dilution) ที่ 10^{-1} – 10^{-4} นำความเจือจางที่ 10^{-2} , 10^{-3} และ 10^{-4} ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร หยดลงใน flask ที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient broth + สารละลายแคดเมียม



ภาพ 8 การทดสอบการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหารเหลวที่มีแคดเมียม

2.2 นำมาเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient broth (NB) ที่มีสารละลายแคดเมียมผสมที่ความเข้มข้น 300, 500, 700, 900 และ 1,000 mg/L ปรับ pH ด้วย NaOH 1.0 N หรือ HCl 1.0 N (ให้ pH= 6.0) บ่มเชื้อไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยเขย่าด้วยเครื่องเขย่า 180 รอบ/นาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ทำ 3 ซ้ำ)

2.3 คู่อัตราการเจริญของจุลินทรีย์โดยวัดจากค่า Optical Density (OD 600 นาโนเมตร) ด้วย Spectrophotometer เปรียบเทียบอัตราการเจริญกับจุลินทรีย์ที่เจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่มีแคดเมียมผสม (ชุดควบคุม) โดยคิดเป็นร้อยละจากชุดควบคุม

3. ทดสอบแบคทีเรียที่ทนและสามารถเจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีแคดเมียม

3.1 เตรียม stock solution ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ของโลหะหนักแคดเมียม ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)

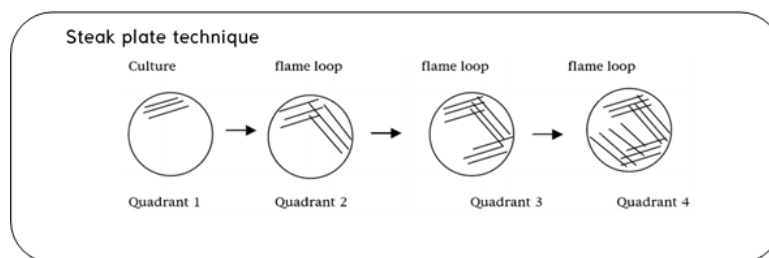
3.2 เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy Agar (TSA) ที่มีสารละลายแคดเมียมผสมที่ความเข้มข้น 700, 900 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับ pH เป็น 6.0 ด้วย NaOH 1.0 N หรือ HCl 1.0 N นำไปทำให้ปราศจากเชื้อในหม้อนึ่งความดันไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส 15 นาที ทิ้งไว้จนอุณหภูมิถึงประมาณ 40 องศาเซลเซียส เทอาหารเลี้ยงเชื้อลงในจานเพาะเชื้อ

3.3 เลือกความเข้มข้นที่จุลินทรีย์เจริญได้ดีและมีปริมาณแคดเมียมลดลงสูงสุด 3 ลำดับจากข้อ 2 (ทดสอบการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหารเหลวที่มีแคดเมียม) มาเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy Agar (TSA)

3.4 จุลินทรีย์เจริญได้ดีและมีปริมาณแคดเมียมลดลงสูงสุด 3 ลำดับใน ข้อ 3.1 มาทำความเจือจางที่ 10^{-1} – 10^{-6} มาเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy Agar (TSA) ที่เตรียมจากข้อ 3.1 ความเจือจางละ 3 จาน และจานควบคุม (จานละ 3 ซ้ำ)

3.5 บ่มจานอาหารเลี้ยงเชื้อไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจนเป็นโคโลนีเดี่ยวนับจำนวนโคโลนีเดี่ยวที่ขึ้นในจานอาหารเลี้ยงเชื้อของชุดตัวอย่างและชุดควบคุม คำนวณ CFU (Colony Forming Unit)

3.6 คัดเลือกแบคทีเรียจากเชื้อที่เจริญบนอาหารผสมโลหะหนัก ในข้อ 1–5 เลือกโคโลนีเดี่ยวที่มีลักษณะแตกต่างกัน แล้วใช้ห่วงเขี่ยเชื้อตักเชื้อจากจานเพาะเชื้อมาแตะที่ผิวจานอาหารเลี้ยงเชื้อลากห่วงเขี่ยเชื้อบนผิวอาหารจานไปมา ด้วยวิธี Steak plate technique



ภาพ 9 เทคนิคการ Steak plate

3.7 เพาห้วงเชื้อเชื้อให้แดงทิ้งให้เย็นในอากาศลวกลดเชื้อซ้ำ ครั้งที่ 2 โดยลวกลดเชื้อซ้ำผ่านเชื้อที่ตะไกวครั้งแรกลวกไปมาบนผิววุ้น ทำเช่นเดียวกันในครั้งที่ 3 และที่ 4

3.8 บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จนเชื้อเจริญได้เป็นโคโลนีเดี่ยว (24- 48 ชั่วโมง) ทำซ้ำจนกว่าจะได้โคโลนีที่มีขนาดเท่ากันและลักษณะเหมือนกัน

3.9 ถ่ายเชื้อจากโคโลนีเดี่ยวที่ได้ลงบนหลอดอาหารเอียง บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเก็บแบคทีเรียที่ได้ไปทดลองขั้นต่อไป

3.10 เก็บรักษาแบคทีเรียด้วยวิธี subculture คือ ทำการเปลี่ยนถ่ายเชื้อลงบนหลอดอาหารเอียงใหม่โดยถ่ายเชื้อทุก ๆ 1 เดือน และเก็บรักษาแบคทีเรียในตู้ทำความเย็น

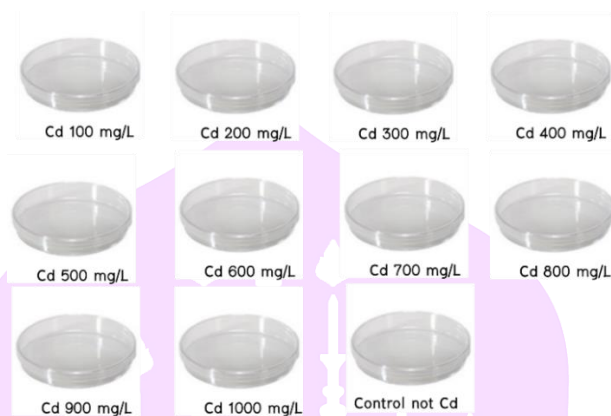
4. การหาความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (Minimal Inhibitory Concentration; MIC)

โดย Minimal Inhibitory Concentration (MIC) คือ ความเข้มข้นของแคดเมียมในระดับต่ำสุด(ในหลอดทดลอง) ที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในสารชีวภัณฑ์ได้ และ Minimum bactericidal concentration (MBC) คือ ความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่จุลินทรีย์ในสารชีวภัณฑ์ไม่สามารถเจริญได้ มีรายละเอียดของการศึกษาดังนี้

4.1 นำจุลินทรีย์ที่คัดแยกได้จากข้อ 3.1.3 (ทดสอบแบคทีเรียที่ทนและสามารถเจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีแคดเมียม) เลือกโคโลนีเดี่ยวที่มีลักษณะแตกต่างกันมาเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient broth (NB) บ่มเชื้อไว้ที่อุณหภูมิห้อง เขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ 180 รอบ/นาที ทิ้งไว้ข้ามคืน

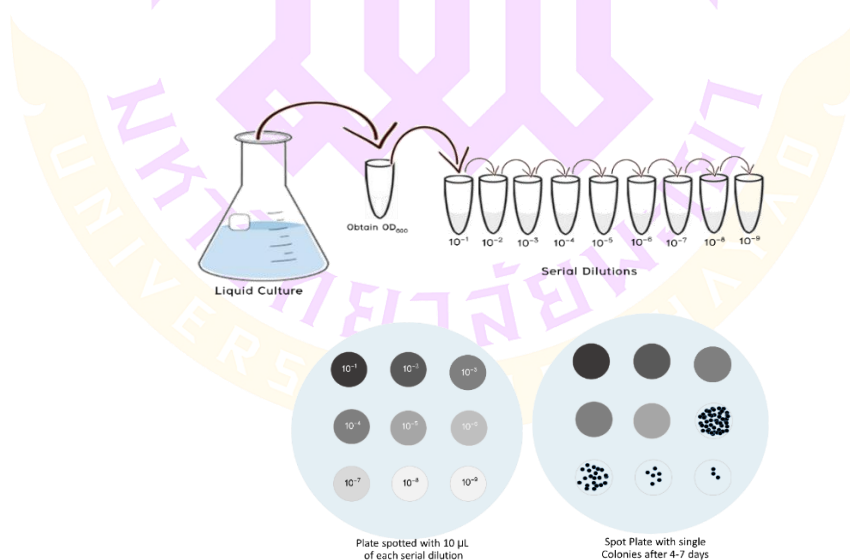
4.2 เตรียม stock solution ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ของโลหะหนัก คือ แคดเมียม ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy Agar (TSA) ที่มีสารละลายแคดเมียมผสมที่ความเข้มข้น 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับ pH เป็น 6.0 ด้วย NaOH 1.0 N หรือ HCl 1.0 N นำไปทำให้ปราศจากเชื้อ

ในหม้อนึ่งความดันไอ ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส 15 นาที ที่ตั้งไว้จนอุณหภูมิถึงประมาณ 40 องศาเซลเซียส เทอาหารเลี้ยงเชื้อลงในจานเพาะเชื้อ



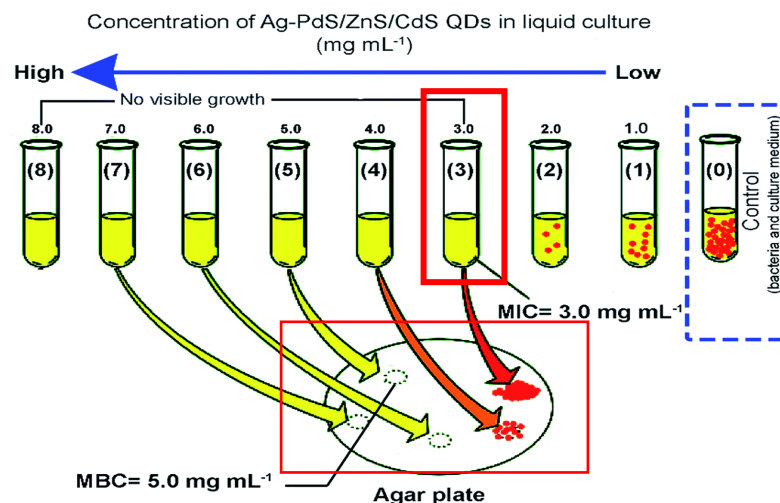
ภาพ 10 แสดงการหา Minimal Inhibitory Concentration

4.3 นำเชื้อที่เจริญใน Nutrient broth (NB) มาเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อจากข้อ 2 โดยใช้วิธี drop plate technique โดยหยดเชื้อลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่แบ่งออกเป็น 9 ช่อง ๆ ละ 1 ไมโครเลตบ่มเชื้อไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ



ภาพ 11 แสดง Drop plate technique

4.4 ตรวจดูการเจริญของเชื้อเพื่อหาค่า MIC และ MBC โดย สังเกตการเจริญของ เชื้อบนจานอาหารด้วยตาเปล่าความเข้มข้นโลหะหนักที่แบคทีเรียไม่สามารถเจริญได้เป็นค่า ความเข้มข้นต่ำสุดของโลหะหนักที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย



ภาพ 12 แสดงการสังเกตความเข้มข้นต่ำสุดของโลหะหนักที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย

5. จำแนกจุลินทรีย์โดยวิธี 16s rDNA

จากการคัดเลือกแบคทีเรียจากเชื้อที่เจริญบนอาหาร TSA เลือกโคโลนีเดียวที่มีลักษณะแตกต่างกัน จำนวน 2 ลักษณะ ถ่ายเชื้อจากโคโลนีเดียวที่ได้ลงบนหลอดอาหารเอียง และส่งจำแนกชนิดแบคทีเรียโดยวิธี 16s rDNA ณ ศูนย์ความหลากหลายทางชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย โดยเทคนิค Polymerase Chain Reaction (PCR) และ primer ที่ใช้คือ 63f (5' – CAG GCC TAA CAC ATG CAAGTC – 3') และ 1387r (5' – GGG CGG WGT GTA CAA GGC–3')

การทดลองสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

การหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์เป็นหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของ

ดินการเจริญของข้าว และการสะสมของแคดเมียมในดินและเมล็ดข้าว โดยออกแบบการทดลองภายในกระถาง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การเตรียมดิน

ดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินจากพื้นที่ทำนาของเกษตรกรบ้านโฆ้ ตำบลแม่ณาเรือ อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา เก็บตัวอย่างดินที่ระดับชั้นผิวดิน 0–30 cm. จากนั้นนำดินมาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของดินพบว่า มีลักษณะเนื้อดิน (soil texture) เป็นดินเหนียว (Loam) โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 5.76 ความหนาแน่นของดิน เท่ากับ 1.10 kg/cm² และสมบัติทางเคมี พบว่ามีปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (Organic matter : OM) เท่ากับ 33.10 mg/kg ปริมาณธาตุอาหารพืช ได้แก่ ไนโตรเจน (Nitrogen: N) เท่ากับ 3.22 g/kg ฟอสฟอรัส (Phosphorus: P) เท่ากับ 1.31 g/kg โพแทสเซียม (Potassium : K) เท่ากับ 32.57 g/kg

เตรียมดินปนเปื้อนสังเคราะห์ 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 ก่อนบรรจุในถุงพลาสติกซิปล็อค ถุงละ 2.5 kg. นำสารละลายที่เตรียมไว้ 250 ml ผสมกับดินให้เข้ากัน บ่มดินในถุงพลาสติกเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ หลังจากนั้นจึงเปิดปากถุงผึ่งดินให้แห้งเป็นเวลา 2 สัปดาห์ (Wuana, R. A. et al., 2010) ดินที่เตรียมได้ผึ่งให้แห้งในที่ร่ม ก่อนบรรจุดิน 15 kg (ควบคุมความหนาแน่นของดินเท่ากับ 1.10 kg/cm²) ในกระถางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 cm และสูง 30 cm เติมน้ำและรักษาระดับน้ำผิวดินไว้ที่ 5 cm

2. การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองโดยเปรียบเทียบสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์จากจุลินทรีย์ และสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์จากโคโคซานที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในนาข้าว โดยทำการทดลองในกระถางที่ปลูกพืช และไม่มีปลูกพืช และวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 5 หน่วยการทดลองๆละ 5 ซ้ำ ดังนี้

ตาราง 12 แสดงการออกแบบการทดลองหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

การทดลอง	หน่วยการทดลอง	ไม่ปลูกพืช					ปลูกพืช				
		100	200	300	400	500	100	200	300	400	500
Control	CH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	OR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Treatment	MIC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CHI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MCH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หมายเหตุ: * 1. CH หมายถึง ดินที่ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 16-20-0 ใช้ในอัตรา 20 kg/rai
 2. OR หมายถึง ดินที่ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ ใช้ในอัตรา 500 กิโลกรัมต่อไร่
 3. MIC หมายถึง ดินที่ใส่สารชีวภัณฑ์จากจุลินทรีย์
 CHI หมายถึง ดินที่ใส่สารชีวภัณฑ์จากโคโคซาน
 MCH หมายถึง ดินที่ใส่สารชีวภัณฑ์จากจุลินทรีย์+โคโคซาน
 4. 100-500 หมายถึง ปริมาณการใช้สารชีวภัณฑ์.....ml/น้ำ 200 L/rai

3. การใช้สารชีวภัณฑ์

สารชีวภัณฑ์ที่ผลิตด้วยกระบวนการที่ควบคุมการผลิต และจำหน่ายโดย บริษัทไบโอง จำกัด จำนวน 2 ชนิด ได้แก่

3.1 สารชีวภัณฑ์จากจุลินทรีย์ เป็นน้ำหมักชีวภาพที่เตรียมจากจุลินทรีย์ ได้แก่ *Achormobacter* sp., *Azoto bacter* sp., *Bacillus* sp. และ *Nitrobacter* sp. โดยมีความเข้มข้นของจุลินทรีย์ ไม่ต่ำกว่า 1.0×10^7 cell/gram (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2556)

ปริมาณการใช้ในการทดลอง ซึ่งเป็นปริมาณที่ทางบริษัทไบโอง จำกัด แนะนำให้เกษตรกรใช้จริงในพื้นที่ แบ่งเป็น 5 ลำดับ ได้แก่

100 ml/น้ำ 200 L/rai

200 ml/น้ำ 200 L/rai

300 ml/น้ำ 200 L/rai

400 ml/น้ำ 200 L/rai

500 ml/น้ำ 200 L/rai

3.2 สารชีวภัณฑ์โคโคซาน เป็นน้ำหมักชีวภาพที่ประกอบด้วยสารโคโคติน โคโคซาน มีความเข้มข้น เท่ากับ 75 ppm (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2556)

ปริมาณการใช้ในการทดลอง ซึ่งเป็นปริมาณที่ทางบริษัทไบรง จำกัด แนะนำให้เกษตรกรใช้จริงในพื้นที่ แบ่งเป็น 5 ลำดับ ได้แก่ 100 ml/น้ำ 200 L/rai

200 ml/น้ำ 200 L/rai

300 ml/น้ำ 200 L/rai

400 ml/น้ำ 200 L/rai

500 ml/น้ำ 200 L/rai

4. การศึกษาผลของสารชีวภัณฑ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมในดิน

ติดตามการเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมในดินทุก 30 วัน โดยเก็บตัวอย่างดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน นำตัวอย่างดินผึ่งในที่ร่มจนแห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรง 100 meshes ชั่งดิน 1 g ย่อยด้วย aqua regia (ส่วนผสมระหว่าง HCl: HNO₃ : HNO₃ – HClO₄ (1:3:1 v/v)) (Yong bing et al., 2019) วิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในดินด้วย Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ที่ความยาวคลื่น 228.8 นาโนเมตร slit width 0.5 นาโนเมตร และ Flame type Air-acetylene จากนั้นรายงานข้อมูลตามระยะการเจริญของข้าว ได้แก่ ระยะการเจริญ (Vegetative Phase) ระยะตั้งท้อง (Reproductive Phase) ระยะเก็บเกี่ยว (Ripening Phase)

5. การศึกษาผลของสารชีวภัณฑ์ต่อการเจริญของข้าว

จากการทดลองในกระถางปลูกข้าวหอมมะลิ 105 (*Oryza sativa* L.) จำนวน 5 ต้น ต่อ 1 กระถาง ดังรายละเอียดการออกแบบการทดลองที่อธิบายไว้ในตาราง 13 แสดงการออกแบบการทดลองหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ ติดตามบันทึกการเจริญเติบโต และผลผลิตของข้าวตามระยะการเจริญ ได้แก่

5.1 ความสูง

5.2 จำนวนต้นตอกกอ

5.3 น้ำหนักต้น

5.4 น้ำหนักราก

5.5 ผลผลิต เช่น น้ำหนักเมล็ด จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์

6. การศึกษาผลของสารชีวภัณฑ์ต่อการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว

นำเมล็ดข้าวที่เก็บเกี่ยวได้ อบที่ 65 C° เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นแยกเปลือกข้าวและเมล็ดข้าวออกจากกัน บดและย่อยด้วย HNO₃ และ H₂O₂ วิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวด้วย Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ที่ความยาวคลื่น 228.8 นาโนเมตร slit width: 0.5 นาโนเมตร และ Flame type: Air-acetylene (Xiaoyan Lin et al., 2016)

7. การเตรียมต้นกล้า

แช่เมล็ดพันธุ์ข้าวขาวมะลิ 105 (*Oryza sativa* L.) ไว้ 2 คืน ห่อด้วยผ้าขาวจนรากงอก 3-5 เซนติเมตร ย้ายปลูกลงในกระบะเพาะที่ขังน้ำไว้ 1 คืน จนต้นกล้าที่มีอายุ 30-45 วัน คัดต้นที่แข็งแรงและมีขนาดเท่ากัน ปลูกลงในกระถางจำนวน 5 ต้นต่อ 1 กระถาง

8. การวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ระหว่างผลผลิตของข้าวและความเข้มข้นของแคดเมียมที่ลดลง และเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมกับค่ามาตรฐานเกษตรอินทรีย์ (IFAOM) ภาคผนวก ก

การหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ตาว

1. การออกแบบการทดลอง

การหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ตาว ออกแบบการทดลองภายในกระถาง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินปนเปื้อนแคดเมียมจากพื้นที่นาข้าว บ้านแม่ตาวใหม่ ตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งเป็นพื้นที่ที่พบความเข้มข้นแคดเมียมในเมล็ดข้าวมากกว่า 0.8 mg/kg (Anongnat Sriprachote et al, 2012) เก็บตัวอย่างดินที่ระดับชั้นผิวดิน 0-30 cm. และวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของดินพบว่าดินในพื้นที่ดังกล่าวมีลักษณะเนื้อดิน (Soil texture) เป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty clay) โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 5.41 ความหนาแน่นของดิน เท่ากับ 1.117 kg/cm³ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคดไอออน (Cation-exchange capacity: CEC) เท่ากับ 36.90 me/100g soil และสมบัติทางเคมี พบว่ามีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic matter : OM) เท่ากับ 30.49 mg/kg ปริมาณธาตุอาหารพืช ได้แก่ ไนโตรเจน (Nitrogen: N) เท่ากับ 4.53 g/kg ฟอสฟอรัส (Phosphorus: P) เท่ากับ 1.20 g/kg โพแทสเซียม (Potassium : K) เท่ากับ 38.52 g/kg ปริมาณโลหะหนักแคดเมียม (Cadmium :Cd) มีค่าเท่ากับ 89.35 mg/kg

นำตัวอย่างดินที่เก็บได้ผึ่งให้แห้งในที่ร่ม แยกเศษพืช กิ่ง ราก หิน ออกจากดิน จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm ก่อนบรรจุดิน 50 kg ในกระถางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 cm และสูง 79 cm เติมน้ำ 30 L และรักษาระดับน้ำผิวดินไว้ที่ 5 cm ออกแบบการทดลองโดยเปรียบเทียบกระถางที่ปลูกข้าว (5 ต้น ต่อ 1 กระถาง) และไม่ปลูกข้าว และวางแผน

การทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 4 หน่วยการทดลอง ๆ ละ 5 ซ้ำ ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 13 แสดงการออกแบบการทดลองหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ตา

การทดลอง	หน่วยการทดลอง	ไม่ปลูกพืช	ปลูกพืช
Control	CHEM	0	0
	P-T	0	0
Treatment	MIC300	0	0
	MIC500	0	0

หมายเหตุ: 1. CHEM หมายถึง ดินที่ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 16-20-0 ใช้ในอัตรา 20 kg/rai
 2. P-T หมายถึง ดินที่ไม่ใส่สารปรับปรุงดิน
 3. MIC300 หมายถึง ดินที่ใส่สารชีวภัณฑ์จากจุลินทรีย์ ปริมาณ 300 ml/น้ำ 200 L/rai
 4. MIC500 หมายถึง ดินที่ใส่สารชีวภัณฑ์จากจุลินทรีย์ ปริมาณ 500 ml/น้ำ 200 L/rai

2. การใช้สารชีวภัณฑ์

สารชีวภัณฑ์ที่ผลิตด้วยกระบวนการที่ควบคุมการผลิต และจำหน่ายโดย บริษัทไบรง จำกัด เป็นน้ำหมักชีวภาพที่เตรียมจากจุลินทรีย์ ได้แก่ Achormobacter sp., Azoto bacter sp., Bacillus sp. และ Nitrobacter sp. โดยมีความเข้มข้นของจุลินทรีย์ ไม่ต่ำกว่า 1.0×10^7 cell/gram (Office of Land Development Science, 2013) ปริมาณการใช้ในการทดลอง เป็นปริมาณที่ทางบริษัทไบรง จำกัด แนะนำให้เกษตรกรใช้จริงในพื้นที่ คือ 300 ml/น้ำ 200 L/rai และ 500 ml/น้ำ 200 L/rai เป็นสัดส่วนที่มีความเหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินมากที่สุด จากการทดลองในข้อ 3.2

3. การศึกษาผลของสารชีวภัณฑ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมในดิน

ติดตามการเปลี่ยนแปลงของแคดเมียมในดินทุก 30 วัน โดยเก็บตัวอย่างดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน นำตัวอย่างดินผึ่งในที่ร่มจนแห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรง 100 meshes ชั่งดิน 1 g ย่อยด้วย aqua regia (ส่วนผสมระหว่าง HCl: HNO₃ : HNO₃ – HClO₄ (1:3:1 v/v)) (Yong bing et al., 2019)

วิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในดินด้วย Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ที่ความยาวคลื่น 228.8 นาโนเมตร slit width 0.5 นาโนเมตร และ Flame type Air-acetylene และ วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน ได้แก่ ไนโตรเจน (Nitrogen: N) ฟอสฟอรัส (Phosphorus: P) โพแทสเซียม (Potassium : K) อินทรีย์วัตถุในดิน (Organic Matter : OM)

จากนั้นรายงานข้อมูลตามระยะการเจริญของข้าว ได้แก่ ระยะการเจริญ (Vegetative Phase) ระยะตั้งท้อง (Reproductive Phase) ระยะเก็บเกี่ยว (Ripening Phase)

4. การศึกษาผลของสารชีวภัณฑ์ต่อการเจริญของข้าว

จากการทดลองในกระถางปลูกข้าวหอมมะลิ 105 (*Oryza sativa* L.) จำนวน 5 ต้น ต่อ 1 กระถาง ดังรายละเอียดการออกแบบการทดลองที่อธิบายไว้ในตาราง 14 แสดงการออกแบบการทดลองหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ตัวติดตามบันทึกการเจริญเติบโต และผลผลิตของข้าวตามระยะการเจริญ ได้แก่

4.1 ความสูง

4.2 จำนวนต้นตอกกอ

4.3 น้ำหนักต้น

4.4 น้ำหนักราก

4.5 ผลผลิต เช่น น้ำหนักเมล็ด จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์

5. การศึกษาผลของสารชีวภัณฑ์ต่อการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว

นำเมล็ดข้าวที่เก็บเกี่ยวได้ อบที่ 65 C° เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นแยกเปลือกข้าว และเมล็ดข้าวออกจากกันบดและย่อยด้วย HNO₃ และ H₂O₂ วิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวด้วย Atomic Absorption Spectrometer (AAS) ที่ความยาวคลื่น 228.8 นาโนเมตร slit width : 0.5 นาโนเมตร และ Flame type: Air-acetylene (Xiaoyan Sriprachote et al., 2016)

6. การเตรียมต้นกล้า

แช่เมล็ดพันธุ์ข้าวหอมมะลิ 105 (*Oryza sativa* L.) ไว้ 2 คืน ห่อด้วยผ้าขาวจนรากงอก 3-5 เซนติเมตร ย้ายปลูกในกระบะเพาะที่ขังน้ำไว้ 1 คืน จนต้นกล้าที่มีอายุ 30-45 วัน คัดต้นที่แข็งแรงและมีขนาดเท่ากัน ปลูกในกระถางจำนวน 5 ต้นต่อ 1 กระถาง

7. การวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ระหว่างผลผลิตของข้าวและความเข้มข้นของแคดเมียมที่ลดลง

และเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมกับค่ามาตรฐานเกษตรอินทรีย์ (IFAOM) ภาคผนวก ก

น้อย รวมถึงความสามารถของพืชด้วย (ธนภัทร ปลื้มพวง และคณะ 2558) โดยแคดเมียมเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีค่าพีเอชต่ำถ้าในดินที่มีสภาพเป็นด่างที่มีพีเอชสูงจะทำให้แคดเมียมไม่ค่อยเคลื่อนที่ความสามารถในการดูดซับของแคดเมียมมีความสัมพันธ์กับพีเอชของดิน โดยความสามารถในการดูดซับของดินจะสูงขึ้นต่อเมื่อดินมีพีเอชสูงขึ้น และดินจะมีอัตราการดูดซับที่สูงเมื่อดินมีพีเอชเท่ากับ 7.5 การดูดซับแคดเมียมเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้รวดเร็ว โดยทั่วไปแคดเมียมจะละลายได้น้อยลงเมื่อดินมีสภาพเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาพฤติกรรมของ Cd^{2+} ใน $CaCO_3$ พบว่าการดูดซับแคดเมียมไอออนใน $CaCO_3$ จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การดูดซับแคดเมียมได้รับอิทธิพลมาจากค่าความเป็นกรดต่าง ionic strength และexchangeable cations พีเอชมีผลต่อการดูดซับโลหะในดิน กล่าวว่าการดูดซับโลหะในดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นดังนั้นเมื่อพีเอชลดลง จะทำให้มีประจุบวกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับไอออนบวกลดลง แต่เพิ่มการดูดซับไอออนลบมากขึ้น แต่การดูดซับของโลหะจะไม่เพิ่มขึ้นที่พีเอชมากกว่า 7 เนื่องจากมีพีเอชเพิ่มขึ้นจะเกิดการแข่งกันการดูดซับของลิแกนด์ชนิดอื่น ๆ ด้วยระยะเวลาที่มีผลต่อการเคลื่อนของโลหะหนักในดินจากการศึกษาพอร์มทางเคมีของแคดเมียมในดิน พบว่าแคดเมียมดูดซับในดินในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนได้(exchangeable) และในรูปcarbonate bound ซึ่งพืชจะสามารถนำไปใช้ได้แต่เมื่อการดูดซับนานขึ้นหรือเกิดการปนเปื้อนเป็นระยะเวลานานแคดเมียมในดินจะอยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้คือ ในรูป iron manganese oxide bound และรูป organic matter bound จะพบว่าในดินเกิดการปนเปื้อนใหม่ แคดเมียมจะยึดเหนี่ยวกับคาร์บอนเนตซึ่งพืชสามารถดูดไปใช้ได้แต่เมื่อเวลาผ่านไปแคดเมียมจะยึดเหนี่ยวกับส่วนที่ตกค้าง ซึ่งพืชจะไม่สามารถนำไปใช้ได้

บทบาทของกรดอินทรีย์ต่อการเคลื่อนที่ของแคดเมียมเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะแคดเมียมกับอินทรีย์ลิแกนด์เป็นตัวควบคุมการละลายของโลหะทำให้แคดเมียมเคลื่อนที่ได้ช้าลงหรือน้อยลง อิทธิพลจากการแข่งกันกับแคดไอออนชนิดอื่น เช่น divalent Ca และZn แคดไอออนเหล่านี้จะเข้ามาแทนที่ของแคดเมียมไอออนทำให้แคดเมียมไอออนเคลื่อนที่หลุดออกมาได้ง่าย

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การประยุกต์ใช้สารชีวภัณฑ์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดินและลดการปนเปื้อนของแคดเมียมในนาข้าว ผู้วิจัยได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 การทดลอง เพื่อศึกษาความทนทานของจุลินทรีย์ในสารชีวภัณฑ์ต่อความเข้มข้นของแคดเมียม และเพื่อหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์และดินปนเปื้อนแม่ดาว โดยแสดงผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1. การตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นของสารชีวภัณฑ์

ผู้วิจัยได้ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของสารชีวภัณฑ์ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ซึ่งพบว่า มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 4.8 และ ค่าการนำไฟฟ้า (EC) เท่ากับ 881.6 μS ดังตาราง 14 สมบัติเบื้องต้นของสารชีวภัณฑ์

ตาราง 14 สมบัติเบื้องต้นของสารชีวภัณฑ์

สมบัติเบื้องต้นของสารชีวภัณฑ์	ผลการทดสอบ
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	4.8
ค่าการนำไฟฟ้า (EC)	881.6 μS

2. การทดสอบการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหารเหลวที่มีแคดเมียม

ผู้วิจัยได้ศึกษาการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหารเหลวที่มีแคดเมียมระดับความเข้มข้น 300-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร บ่มเชื้อไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยเขย่าด้วยเครื่องเขย่า 180 รอบ/นาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง วัดค่า Optical Density (OD 600 นาโนเมตร) ด้วยเครื่อง Spectrophotometer รายละเอียดดังตาราง 15 การเจริญของจุลินทรีย์ที่ทนต่อแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 300 500 700 900 และ 1000 mg/L ค่าการดูดกลืนแสง OD 600 ระยะเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าในระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่สูง ค่าการดูดกลืนแสงจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และลดน้อยลง เท่ากับ 0.324 ที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 1000 mg/L สอดคล้องกับอัตราการเจริญของจุลินทรีย์ คิดเป็นร้อยละ 21.07 ซึ่งหมายความว่าจุลินทรีย์ในสารชีวภัณฑ์

สามารถเจริญได้ในสภาวะแวดล้อมที่มีแคดเมียมปนเปื้อนและความสามารถในการปนเปื้อนของแคดเมียมจะลดลงตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในสภาวะแวดล้อมนั้น

ตาราง 15 การเจริญของจุลินทรีย์ที่ทนต่อแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 300–1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าการดูดกลืนแสง OD 600 ระยะเวลา 48 ชั่วโมง

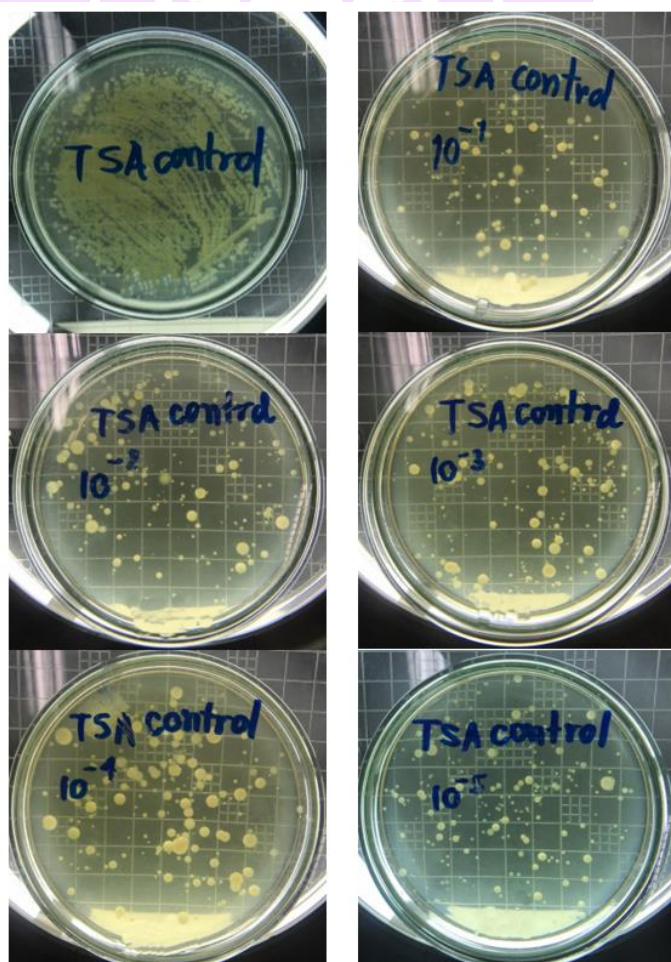
แคดเมียม (mg/L)	ค่า O.D ที่ระดับความเข้มข้น (mg/L)							
	10^{-1}		10^{-2}		10^{-3}		10^{-4}	
	O.D	%	O.D	%	O.D	%	O.D	%
Control	1.62	100.00	1.74	100.00	1.57	100.00	1.54	100.00
300 mg/ L	1.56	96.35	1.50	86.12	1.11	70.57	1.22	79.29
500 mg/L	0.87	53.62	1.19	68.16	0.96	61.00	1.11	72.45
700 mg/L	0.19	11.60	0.43	24.87	0.55	34.76	1.00	65.58
900 mg/L	0.17	10.18	0.40	22.92	0.50	31.60	0.82	53.40
1000 mg/L	0.00	0.12	0.34	19.19	0.46	29.53	0.32	21.07

3. ทดสอบแบคทีเรียที่ทนและสามารถเจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีแคดเมียม

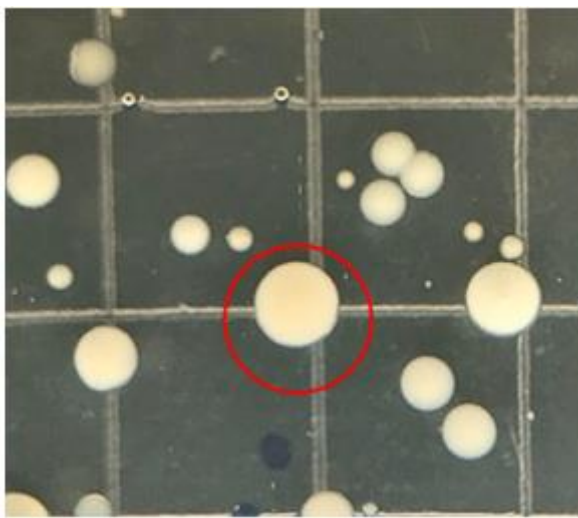
ผู้วิจัยได้ทดสอบแบคทีเรียที่ทนและสามารถเจริญในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีแคดเมียมด้วยการเลี้ยงจุลินทรีย์ ในอาหาร Tryptic Soy Agar (TSA) ที่มีสารละลายแคดเมียมผสมที่ความเข้มข้น 300 500 700 900 และ 1000 mg/L เพื่อทราบจำนวนจุลินทรีย์ที่สามารถบนอาหารที่มีแคดเมียมในระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า การเจริญของจุลินทรีย์มีแนวโน้มลดลงตามลำดับความเข้มข้นของแคดเมียมในอาหารเลี้ยงเชื้อ เมื่อเทียบกับ Control ที่ไม่ผสมแคดเมียมในอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยพบว่าที่ระดับความเข้มข้นแคดเมียมสูง 1000 mg/ L จุลินทรีย์สามารถทนและเจริญได้ โดยมี ปริมาณเท่ากับ 6.21×10^3 CFU/ml คิดเป็นร้อยละ 10.58 เมื่อเทียบกับ Control

ตาราง 16 จำนวนแบคทีเรียที่สามารถเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy Agar (TSA) สารละลายแคดเมียมผสม

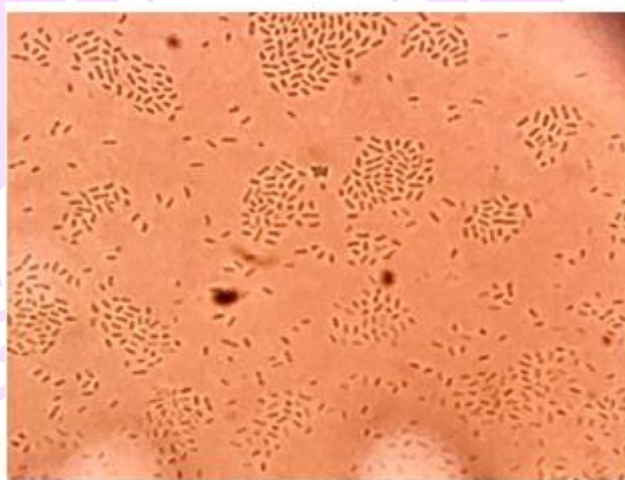
แคดเมียม (mg/L)	จำนวนแบคทีเรีย	
	CFU/ml	%
Control	5.87×10^4	100
300 mg/ L	2.94×10^4	50.09
500 mg/L	2.68×10^4	45.66
700 mg/L	2.36×10^4	40.20
900 mg/L	7.47×10^3	12.73
1000 mg/L	6.21×10^3	10.58



ภาพ 13 การนับโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic soy agar (TSA)



ภาพ 14 คัดเลือกแบคทีเรียจากเชื้อที่เจริญบนอาหาร TSA เลือกโคโลนีเดียวที่มีลักษณะแตกต่างกันลักษณะโคโลนีมีสีขาวขุ่น ขอบเรียบและผิวหน้ามัน



ภาพ 15 ภาพถ่ายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า

4. การหาความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (Minimal Inhibitory Concentration; MIC)

ผู้วิจัยได้ศึกษาเพื่อหาความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย (Minimal Inhibitory Concentration; MIC) โดยเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Tryptic Soy Agar (TSA) ที่ผสมแคดเมียม ตรวจสอบการเจริญของเชื้อเพื่อหาค่า MIC โดย สังเกตการ

เจริญของเชื้อบนจานอาหารด้วยตาเปล่าความเข้มข้นโลหะหนักที่แบคทีเรียไม่สามารถเจริญได้ เป็นค่าความเข้มข้นต่ำสุดของโลหะหนักที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย

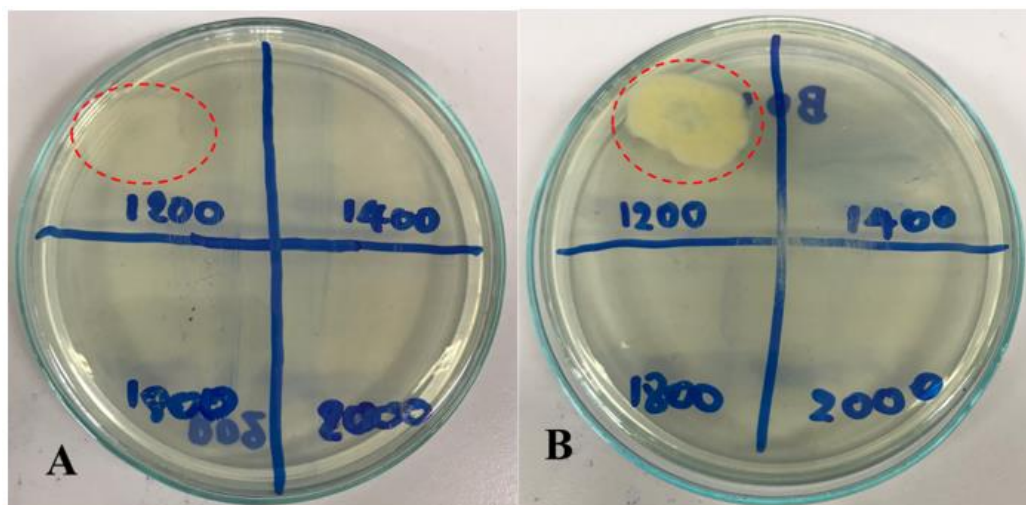
ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย (Minimal Inhibitory Concentration; MIC) ของแบคทีเรียชนิด A และ B เท่ากับ 1,200 mg/L และค่าความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียได้ (Minimum Bactericidal Concentration :MBC) ของแบคทีเรียชนิด A และ B เท่ากับ 1,400 mg/L

ตาราง 17 แสดงค่าความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่แบคทีเรียสามารถเจริญได้ (MIC)

แบคทีเรีย	MIC (mg/L)	MBC (mg/L)
A	1,200	1,400
B	1,200	1,400



ภาพ 16 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่แบคทีเรียสามารถเจริญได้ (MIC)



ภาพ 17 ความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่แบคทีเรียไม่สามารถเจริญได้
(Minimum Bactericidal Concentration :MBC)

การจำแนกชนิดแบคทีเรียโดยวิธี 16s rDNA

จากการคัดเลือกแบคทีเรียจากเชื้อที่เจริญบนอาหาร TSA เสือกโคโลนีเดี่ยวที่มีลักษณะแตกต่างกัน จำนวน 2 ลักษณะ ถ่ายเชื้อจากโคโลนีเดี่ยวที่ได้ลงบนหลอดอาหารเอียง และส่งจำแนกชนิดแบคทีเรียโดยวิธี 16s rDNA ณ ศูนย์ความหลากหลายทางชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย พบว่าแบคทีเรียชนิด A มีความใกล้เคียงของ 16s rDNA กับแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ *Bacillus safensis* subsp. *safensis* มีความใกล้เคียงของ 16s rDNA คิดเป็นร้อยละ 99.93 และ *Bacillus australimaris* มีความใกล้เคียงของ 16s rDNA คิดเป็นร้อยละ 99.78 ส่วนแบคทีเรียชนิด B มีความใกล้เคียงของ 16s rDNA กับ *Bacillus safensis* subsp. *osmophilus* คิดเป็นร้อยละ 99.93

ตาราง 18 การจำแนกชนิดแบคทีเรียโดยวิธี 16s rDNA

แบคทีเรีย	Identified as	% Similarity
A	<i>Bacillus safensis</i> subsp. <i>safensis</i>	99.93
	<i>Bacillus australimaris</i> .	99.78
B	<i>Bacillus safensis</i> subsp. <i>osmophilus</i>	99.93

การทดลองสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

การหาลักษณะของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลสมบัติของดินก่อนการทดลอง
 - 1.1 ข้อมูลสมบัติทางกายภาพของดินก่อนการทดลอง
 - 1.2 ข้อมูลสมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง
2. ข้อมูลสมบัติของดินระหว่างการทดลอง
 - 2.1 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในข้าว
 - 2.2 ข้อมูลการเจริญเติบโตของข้าว
 - 2.3 ข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest index: HI) และผลผลิตของข้าว
 - 2.4 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียม (Cd) สุ่มเมล็ด
 - 2.5 ข้อมูลความสามารถในการเคลื่อนย้ายของแคดเมียม

โดยแสดงรายละเอียดของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลสมบัติของดินก่อนการทดลอง

ผู้วิจัยรวบรวมข้อมูลสมบัติของดินก่อนการทดลองทั้งข้อมูลสมบัติทางกายภาพสมบัติทางเคมีของดิน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบในการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินระหว่าง และหลังการทดลอง ดังข้อมูลต่อไปนี้

- 1.1 ข้อมูลสมบัติทางกายภาพของดินก่อนการทดลอง

ผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของดินก่อนการทดลอง ประกอบด้วย ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อนุภาคดิน (Soil particles) เนื้อดิน (Soil Texture) โดยดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินปนเปื้อนสังเคราะห์ โดยการเติมแคดเมียมไนเตรท ($Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) มีอัตราส่วนผสมดิน:สารละลายเท่ากับ 10:1 (ระดับการปนเปื้อนในดิน 500 mg/kg) (Wuana, R. A. et al., 2010) ควบคุมความหนาแน่นเท่ากับ 1.10 kg/cm³ จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของดินพบว่า ค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ 31.00 μS ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7.76 อนุภาคดิน ประกอบด้วย ดินทราย 10.00% ดินร่วน 52.00 % ดินเหนียว 38.00 % และลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียวปนตะกอน (Silty clay loam) ดังตาราง 19

ข้อมูลสมบัติทางกายภาพของดินก่อนการทดลอง

ตาราง 19 ข้อมูลสมบัติทางกายภาพของดินก่อนการทดลอง

Soil Physic	\bar{x}	
Electrical Conductivity (μ S)	31	
pH	7.76	
Soil particles (%)	Sand	10
	Silt	52
	Clay	38
Texture	silty clay loam	

1.2 ข้อมูลสมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง

ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลสมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง ประกอบด้วยปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic Matter : OM) ปริมาณธาตุอาหารพืช ได้แก่ ไนโตรเจน (Nitrogen : N) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available Phosphorus : P) ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Available Potassium : K) และปริมาณแคดเมียมในดิน (Cadmium : Cd) โดยดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินปนเปื้อนสังเคราะห์ โดยการเติมแคดเมียมไนเตรท ($Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) มีอัตราส่วนผสมดิน:สารละลายเท่ากับ 10:1 (ระดับการปนเปื้อนในดิน 500 mg/kg) (Wuana, R. A. et al., 2010) จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน พบว่ามีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเท่ากับ 33.10 g/kg ไนโตรเจน เท่ากับ 3.22 g/kg ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 1.31 mg/kg ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 32.57 mg/kg และปริมาณแคดเมียมในดิน เท่ากับ 104.2 mg/kg ดังตาราง 20 ข้อมูลสมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง

ตาราง 20 ข้อมูลสมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง

Soil chemistry	\bar{x}
Organic Matter (g/kg)	33.10
Nitrogen (g/kg)	3.22
Available Phosphorus (mg/kg)	1.31
Available Potassium (mg/kg)	32.57
Cadmium (mg/kg)	104.2

2. ข้อมูลสมบัติของดินระหว่างการทดลอง

ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลสมบัติทางเคมีของดินระหว่างการทดลอง ตามระยะการเจริญของพืช ใน 3 ระยะ คือ ระยะการเจริญทางลำต้น (Vegetative Phase) ระยะการเจริญทางการสืบพันธุ์ (Reproductive Phase) ระยะการเจริญในการสร้างเมล็ด (Ripening Phase) ประกอบด้วย ปริมาณแคดเมียมในดินในข้าว ข้อมูลการเจริญเติบโตของข้าว และผลผลิตของข้าว โดยผลการศึกษาแสดง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

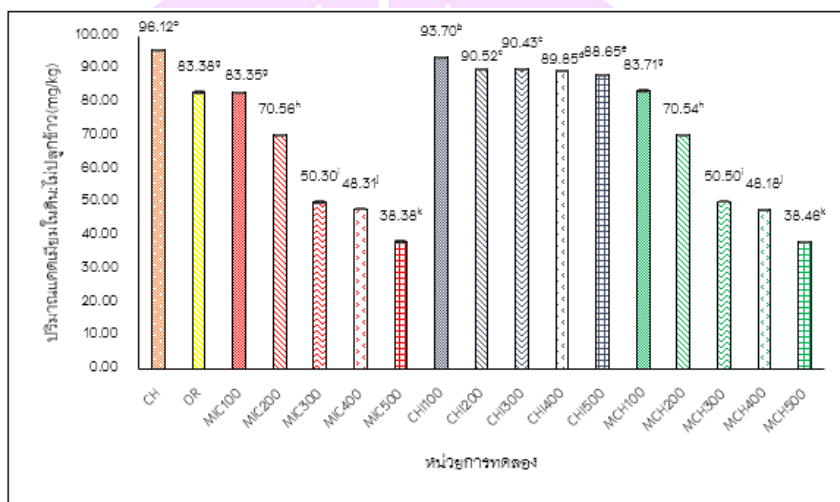
2.1 ข้อมูลปริมาณแคดเมียมในดิน

ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลปริมาณแคดเมียมในดินของการทดลองที่ปลูกพืชและไม่ปลูกพืชเพื่อเปรียบเทียบการลดลงของแคดเมียมในดิน พบว่ามีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ปริมาณแคดเมียมในดินมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและลดลงอย่างต่อเนื่องจากระยะ Vegetative Phase Reproductive Phase และลดลงมากที่สุดในระยะ Ripening Phase จากตาราง 30 ข้อมูลปริมาณแคดเมียมในดิน : ไม่ปลูกข้าว (ภาคผนวก ค) พบว่าในทั้ง 3 ระยะของการเจริญนั้น ปริมาณแคดเมียมในดินจะลดลงตามปริมาณการใช้ของสารชีวภัณฑ์ ซึ่งในระยะ Vegetative Phase พบว่า CH มีปริมาณแคดเมียมมากที่สุด เท่ากับ 96.12 ± 0.06 mg/kg และ CHI100-CHI500 และ MCH100 มีค่าอยู่ระหว่าง 83.71 ± 0.14 g – 93.70 ± 0.01 mg/kg มีค่ามากกว่า OR ที่มีค่าเท่ากับ 83.38 ± 0.14 mg/kg ในขณะที่ MCH200 – MCH500 และ MIC100 – MIC500 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 83.35 ± 0.02 – 38.38 ± 0.14 mg/kg อย่างไรก็ตามพบว่า MIC500 มีปริมาณแคดเมียมในดินน้อยที่สุดคือ 38.38 ± 0.14 mg/kg ในระยะนี้ทุกหน่วยการทดลองยังมีค่ามากกว่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ต้องไม่เกิน 37 mg/kg)

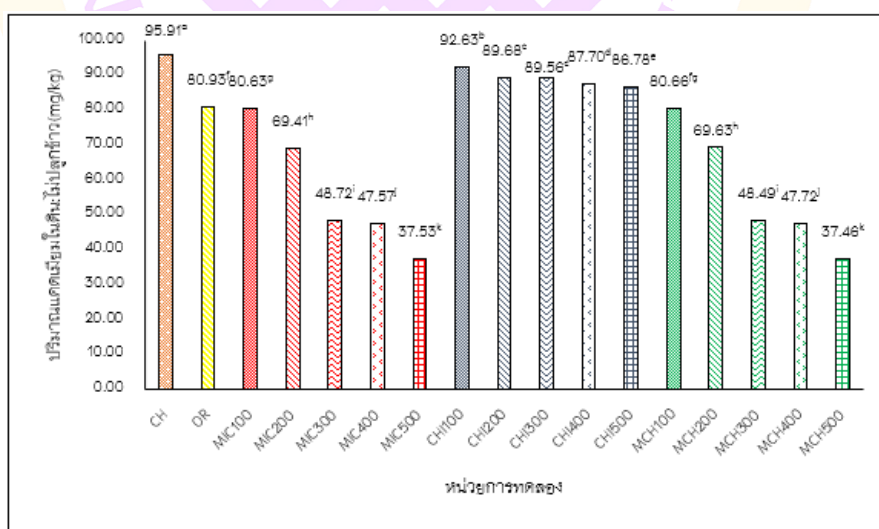
ระยะ Reproductive Phase พบว่า CH มีปริมาณแคดเมียมมากที่สุด เท่ากับ 95.91 ± 0.09 mg/kg และ CHI100-CHI500 มีค่าอยู่ระหว่าง 86.78 ± 0.01 – 92.63 ± 0.01 mg/kg มีค่ามากกว่า OR ที่มีค่าเท่ากับ 80.93 ± 0.26 mg/kg ในขณะที่ MCH100 – MCH500 และ MIC100 – MIC500 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 37.46 ± 0.01 – 80.66 ± 0.14 mg/kg อย่างไรก็ตามพบว่า MCH500 มีปริมาณแคดเมียมในดินน้อยที่สุดคือ 37.46 ± 0.01 mg/kg ซึ่งมีค่ามากกว่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ต้องไม่เกิน 37 mg/kg)

ระยะ Ripening Phase พบว่า CH มีปริมาณแคดเมียมมากที่สุด เท่ากับ 94.57 ± 0.06 mg/kg และ CHI100-CHI500 MIC100 และ MCH100 มีค่าอยู่ระหว่าง 78.61 ± 0.14 –

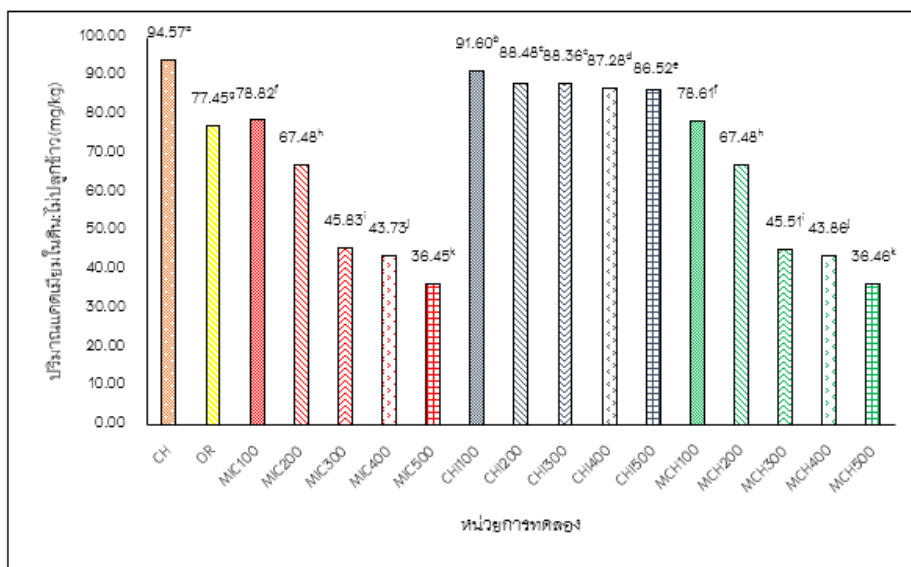
91.60±0.01 mg/kg มีค่ามากกว่า OR ที่มีค่าเท่ากับ 77.45±0.14 mg/kg ในขณะที่ MCH200 – MCH500 และ MIC200–MIC500 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 36.45±0.14 – 67.48±0.05 mg/kg อย่างไรก็ตามพบว่า MIC500 มีปริมาณแคดเมียมในดินน้อยที่สุดคือ 36.45±0.14 mg/kg ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัย และเกษตรกรรม โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ต้องไม่เกิน 37 mg/kg)



ภาพ 18 ปริมาณแคดเมียมในดิน :ไม่ปลูกข้าว ระยะ Vegetative Phase



ภาพ 19 ปริมาณแคดเมียมในดิน :ไม่ปลูกข้าว ระยะ Reproductive Phase

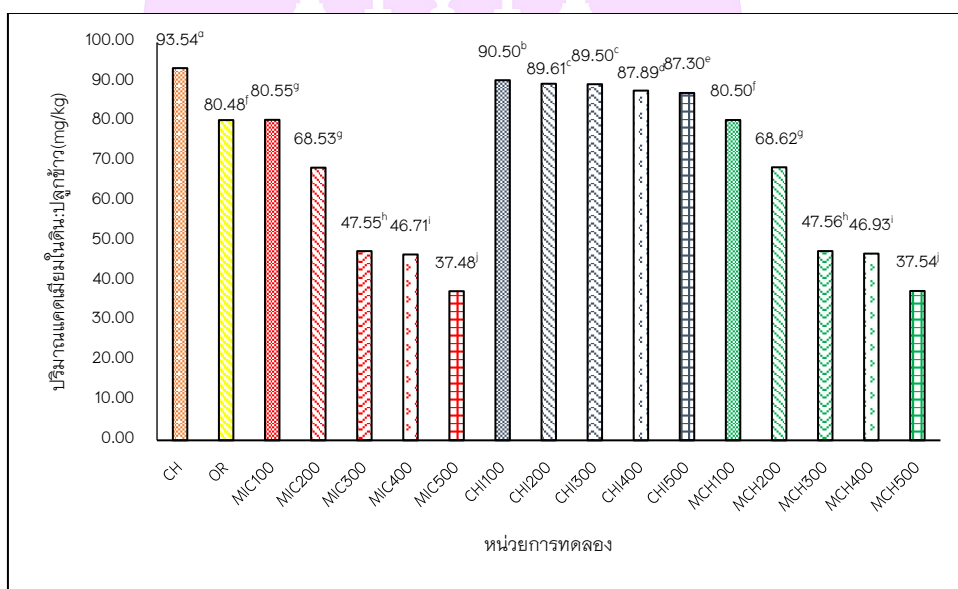


ภาพ 20 ปริมาณแคดเมียมในดิน :ไม่ปลูกรำ ระยะ Ripening Phase

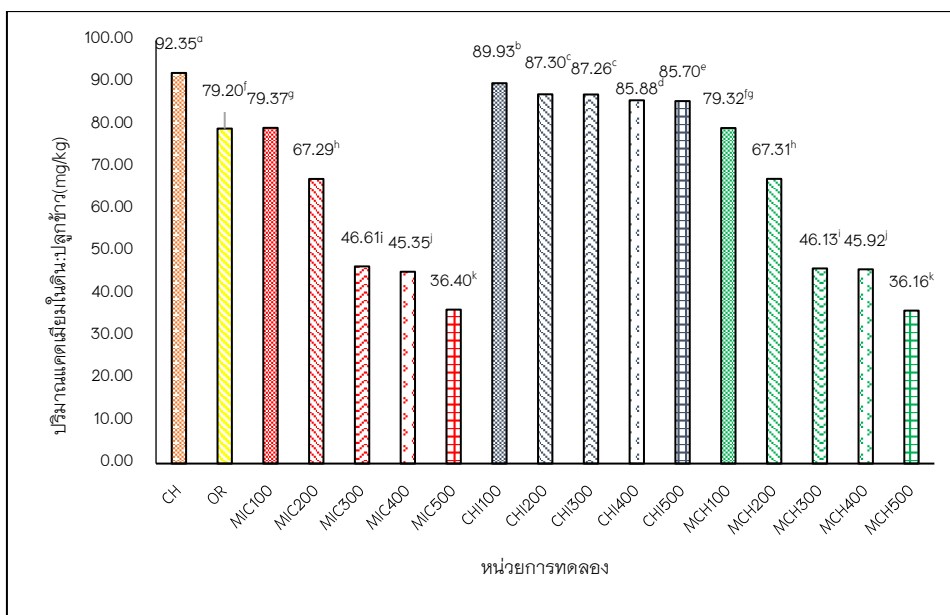
เมื่อพิจารณาตาราง 31 ข้อมูลปริมาณแคดเมียมในดิน : ปลูกข้าว (ภาคผนวก ค) พบว่าในระยะ Vegetative Phase พบว่า CH มีปริมาณแคดเมียมมากที่สุด เท่ากับ 93.54 ± 0.11 mg/kg และ CHI100–CHI500 มีค่าอยู่ระหว่าง 87.30 ± 0.01 – 90.50 ± 0.01 mg/kg มีค่ามากกว่า OR ที่มีค่าเท่ากับ 80.48 ± 0.28 mg/kg ในขณะที่ MCH200 – MCH500 และ MIC200–MIC500 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 37.48 ± 0.11 – 68.62 ± 0.06 mg/kg อย่างไรก็ตามพบว่า MIC500 มีปริมาณแคดเมียมในดินน้อยที่สุดคือ 37.48 ± 0.11 mg/kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ต้องไม่เกิน 37 mg/kg)

ระยะ Reproductive Phase พบว่า CH มีปริมาณแคดเมียมมากที่สุด เท่ากับ 92.35 ± 0.06 mg/kg และ CHI100–CHI500 MIC100 และ MCH100 มีค่าอยู่ระหว่าง 79.32 ± 0.05 – 89.93 ± 0.01 mg/kg มีค่ามากกว่า OR ที่มีค่าเท่ากับ 79.20 ± 0.23 mg/kg ในขณะที่ MCH200 – MCH500 และ MIC200–MIC500 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 36.40 ± 0.15 – 67.31 ± 0.07 mg/kg อย่างไรก็ตามพบว่า MIC500 มีปริมาณแคดเมียมในดินน้อยที่สุดคือ 36.40 ± 0.15 mg/kg ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ต้องไม่เกิน 37 mg/kg)

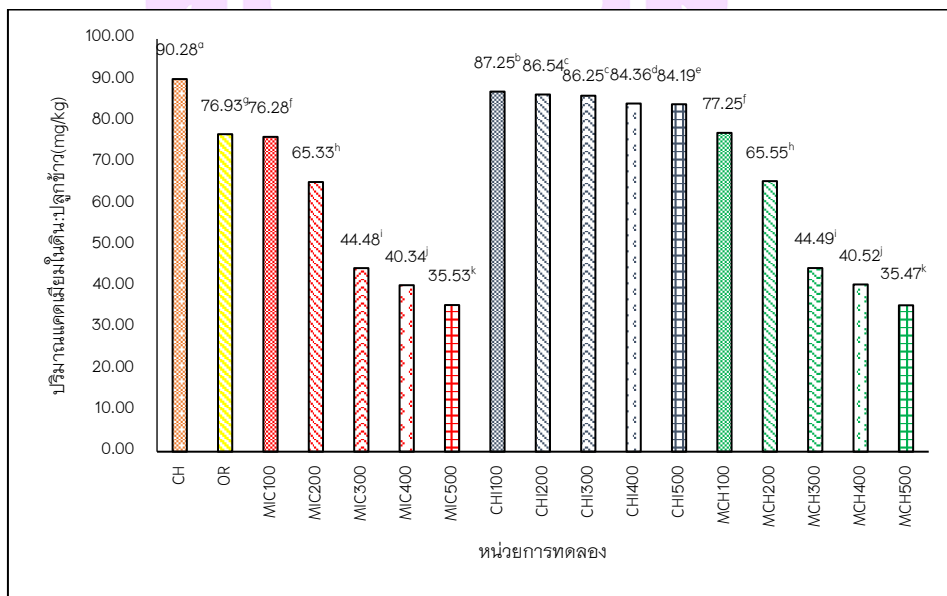
ระยะ Ripening Phase พบว่า CH มีปริมาณแคดเมียมมากที่สุด เท่ากับ 93.54 ± 0.22 mg/kg และ CHI100–CHI500 MIC100 และ MCH100 มีค่าอยู่ระหว่าง 80.50 ± 0.09 – 90.50 ± 0.01 mg/kg มีค่ามากกว่า OR ที่มีค่าเท่ากับ 80.48 ± 0.33 mg/kg ในขณะที่ MCH200 – MCH500 และ MIC200–MIC500 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 35.47 ± 0.03 – 68.53 ± 0.20 mg/kg อย่างไรก็ตามพบว่า MCH500 มีปริมาณแคดเมียมในดินน้อยที่สุดคือ 35.47 ± 0.03 mg/kg ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัย และเกษตรกรรม โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ต้องไม่เกิน 37 mg/kg)



ภาพ 21 ปริมาณแคดเมียมในดิน :ปลูกรุ่น Vegetative Phase



ภาพ 22 ปริมาณแคดเมียมในดิน:ปลูกรำข้าว ระยะ Reproductive Phase



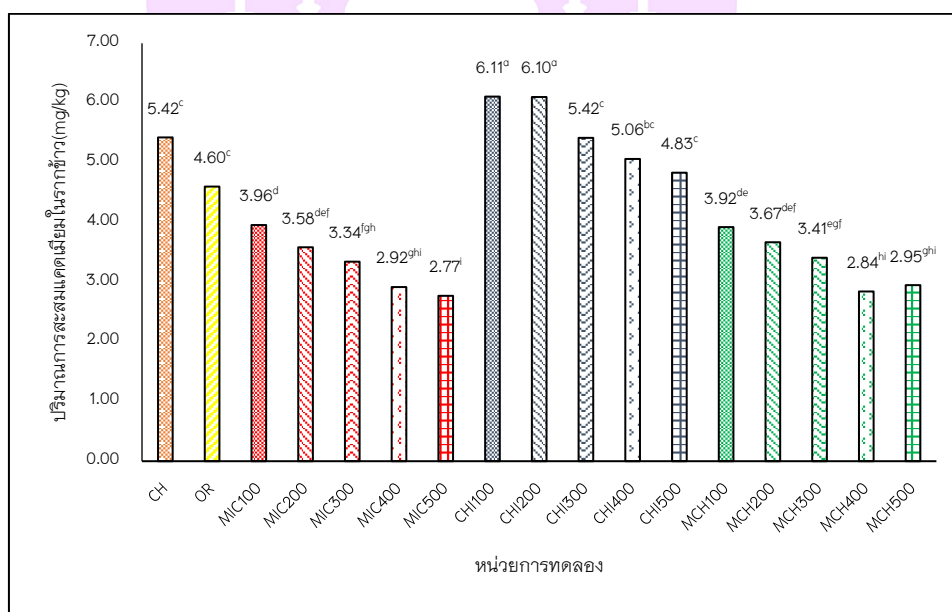
ภาพ 23 ปริมาณแคดเมียมในดิน :ปลูกรำข้าว ระยะ Ripening Phase

2.2 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในข้าว

ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียม ในส่วนต่างๆของข้าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ รากข้าว ต้นข้าว และเมล็ดข้าว ในส่วนของเมล็ดข้าวแยกการศึกษา

ปริมาณการสะสมของแคดเมียมออกเป็น 3 ส่วน คือ เปลือกข้าว (Rice hulls) ข้าวขัดสีหรือเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออก (Polished rice) และเมล็ดที่ไม่เอาเปลือกออก (Rice in the husks) โดยผลการศึกษาแสดง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

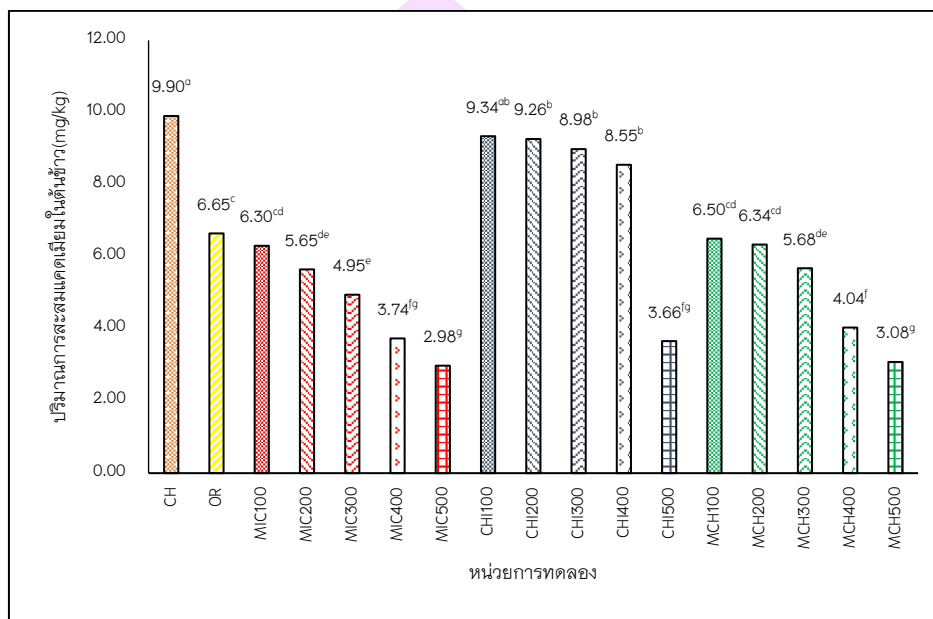
จากตาราง 32 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในรากข้าว (ภาคผนวก ค) และ ภาพ 24 ปริมาณการสะสมของแคดเมียมในรากข้าว พบว่าการทดลอง CH100 มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในรากข้าวมากที่สุด คือ 5.42 ± 0.15 mg/kg รองลงมาได้แก่ CH และ CHI200-CHI500 มีค่าอยู่ในช่วง $4.83 \pm 0.16 - 6.10 \pm 0.22$ mg/kg ซึ่งมีค่ามากกว่า OR (4.60 ± 0.20 mg/kg) ร้อยละ 24.59 ทั้งนี้ MIC100-MIC500 และ MCH100-MCH500 มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง $2.77 \pm 0.00 - 3.96 \pm 0.13$ mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ขณะที่ MIC500 มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 2.77 ± 0.00 mg/kg มีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่า CH และ OR ร้อยละ 48.89 และ 39.78



ภาพ 24 ปริมาณการสะสมของแคดเมียมในรากข้าว

จากตาราง 33 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าว (ภาคผนวก ค) และ ภาพ 25 ปริมาณการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าว พบว่าการทดลอง CH มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าวมากที่สุด คือ 9.90 ± 0.93 mg/kg รองลงมาได้แก่ CHI100-CHI400 มีค่าอยู่ในช่วง $8.55 \pm 0.20 - 9.34 \pm 0.19$ mg/kg ซึ่งมีค่ามากกว่า OR (6.65 ± 0.17) ร้อยละ

22.22 ทั้งนี้ MIC100–MIC500 และ MCH100–MCH500 มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 2.98 ± 0.00 – 6.50 ± 0.09 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่ MIC500 มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 2.98 ± 0.00 mg/kg มีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่า CH และ OR ร้อยละ 69.90 และ 55.19



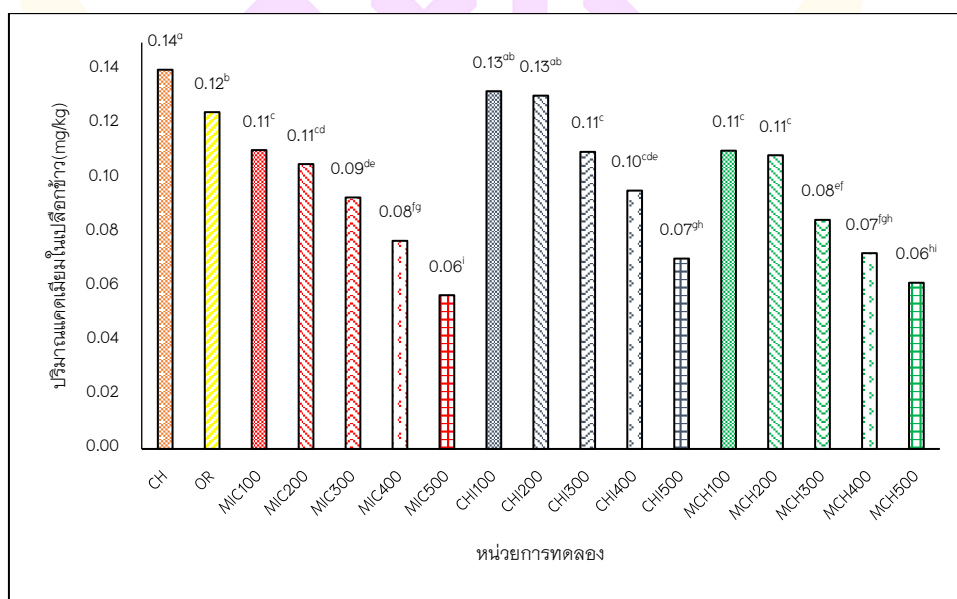
ภาพ 25 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าว

จากตาราง 34 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว (ภาคผนวก ค) และ ภาพ 28 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว: rice in the husks พบว่าการทดลอง CH มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่สุด คือ 0.65 ± 0.01 mg/kg รองลงมาได้แก่ CHI100 มีค่าเท่ากับ 0.61 ± 0.01 mg/kg ซึ่งมีค่ามากกว่า OR (0.59 ± 0.01) ร้อยละ 3.28 ทั้งนี้ MIC100–MIC500 และ MCH200–MCH500 มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.24 ± 0.00 – 0.56 ± 0.01 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่ MIC500 มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 0.24 ± 0.00 mg/kg มีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่า CH และ OR ร้อยละ 63.08 และ 59.32 ซึ่งมีค่ามากกว่ามาตรฐาน Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) ที่กำหนดไว้ที่ไม่เกิน 0.20 mg/kg

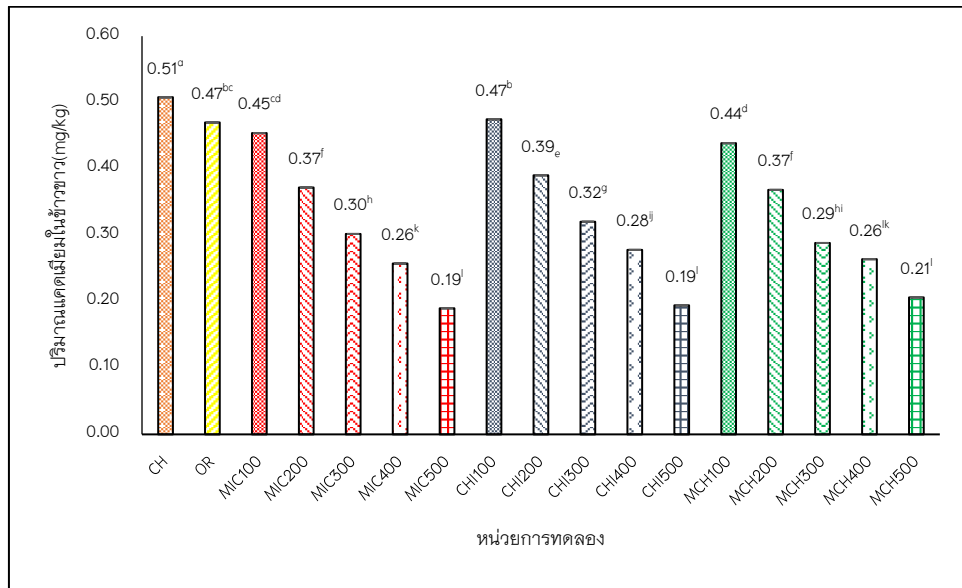
จากตาราง 34 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว (ภาคผนวก ค) และ ภาพ 26 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว: rice hulls พบว่าการทดลอง

CH มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเปลือกข้าว (rice hulls) คือ 0.140 ± 0.007 mg/kg รองลงมาได้แก่ CHI100- CHI200 มีค่าเท่ากับ 0.132 ± 0.004 และ 0.130 ± 0.003 mg/kg ซึ่งมีค่ามากกว่า OR (0.124 ± 0.00) ร้อยละ 6.06 ทั้งนี้ MIC100-MIC500, CHI300-CHI500 และ MCH100-MCH500 มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.054 ± 0.002 - 0.110 ± 0.000 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ขณะที่ MIC500 มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 0.054 ± 0.002 mg/kg มีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่า CH และ OR ร้อยละ 61.43 และ 56.45 ซึ่งมีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) ที่กำหนดไว้ที่ไม่เกิน 0.20 mg/kg

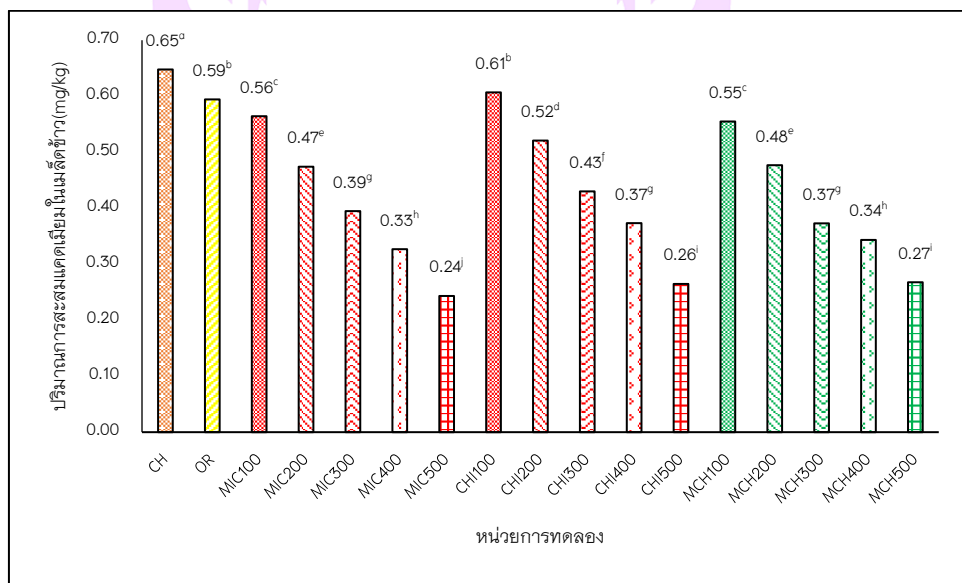
จากตาราง 34 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว (ภาคผนวก ค) และ ภาพ 27 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว: polished rice พบว่าการทดลอง CH มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในข้าวขัดสีหรือเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออก (polished rice) คือ 0.51 ± 0.007 mg/kg รองลงมาได้แก่ CHI100 มีค่าเท่ากับ 0.47 ± 0.004 mg/kg ซึ่งมีค่าเท่ากับ OR (0.47 ± 0.008) ทั้งนี้ MIC100-MIC500, CHI200-CHI500 และ MCH100-MCH500 มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.19 ± 0.006 - 0.45 ± 0.009 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ขณะที่ MIC500 มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 0.19 ± 0.006 mg/kg มีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่า CH และ OR ร้อยละ 62.75 และ 59.57 ซึ่งมีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) ที่กำหนดไว้ที่ไม่เกิน 0.20 mg/kg



ภาพ 26 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว: rice hulls



ภาพ 27 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว: polished rice



ภาพ 28 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว: rice in the husks

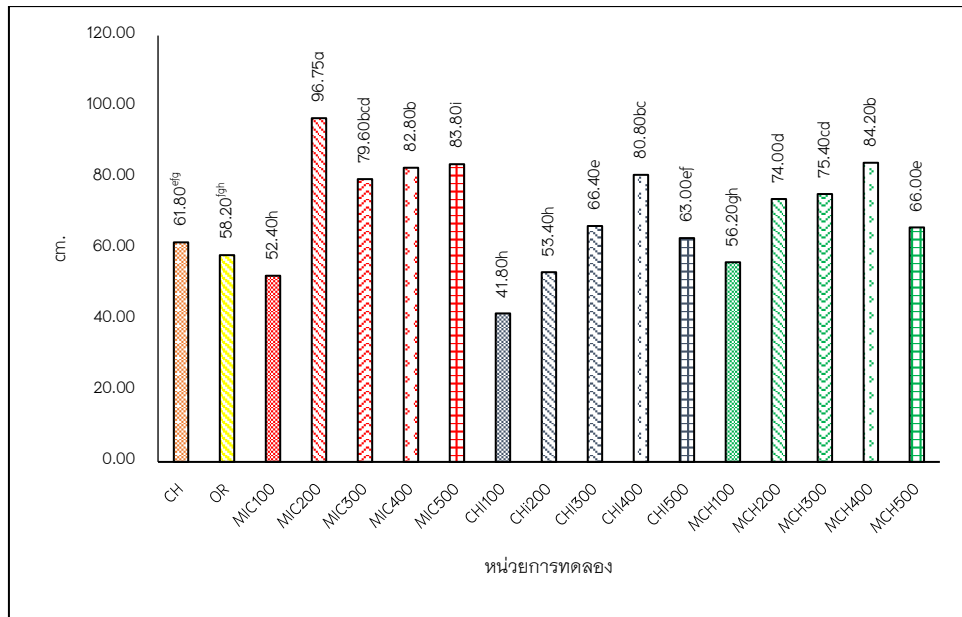
2.3 ข้อมูลการเจริญเติบโตของข้าว

ผู้วิจัยได้ศึกษาการเจริญเติบโตของข้าว ได้แก่ ความสูงของต้นข้าว จำนวนต้น
น้ำหนักรากข้าว น้ำหนักต้นข้าว โดยผลการศึกษาใน 3 ระยะการเจริญเติบโต ได้แก่ Reproductive
Phase Ripening Phase และVegetative Phase ดังรายละเอียดต่อไปนี้

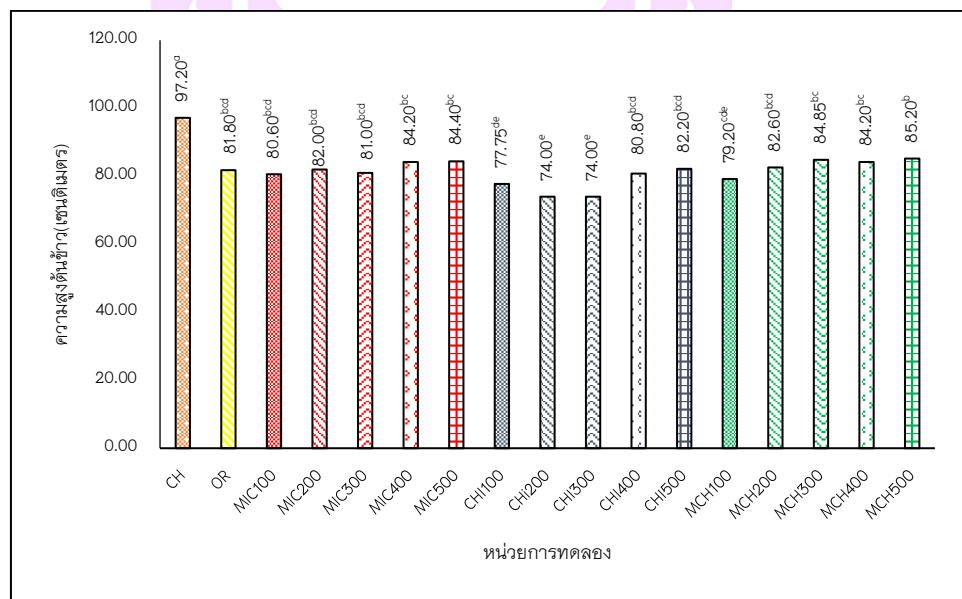
จากตาราง 35 ข้อมูลความสูงของต้นข้าว (ภาคผนวก ค) และ ภาพ 29-31
ข้อมูลความสูงของต้นข้าว พบว่าในระยะ Vegetative Phase การทดลอง MIC200 มีความสูง
ของต้นข้าวมากที่สุด คือ 96.75 ± 0.75 cm รองลงมา ได้แก่ MCH200- MCH500, MIC200-
MCH500 และ CHI200- CHI500 มีค่าอยู่ระหว่าง 63.00 ± 1.41 - 84.20 ± 1.53 cm ตามลำดับ
ซึ่งสูงกว่า OR และ CH (61.80 ± 0.58 และ 58.20 ± 1.36 cm) ร้อยละ 1.94 และ 8.25 ตามลำดับ
ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ในระยะ Reproductive Phase การทดลอง CH มีความสูงของต้นข้าวมากที่สุด
คือ 97.20 ± 4.50 cm รองลงมา ได้แก่ MCH200- MCH500, MIC200, MIC200, MCH500 และ
CHI500 มีค่าอยู่ระหว่าง 82.00 ± 0.71 - 85.20 ± 0.49 cm ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่า OR (81.80 ± 0.20 cm)
ร้อยละ 0.24 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

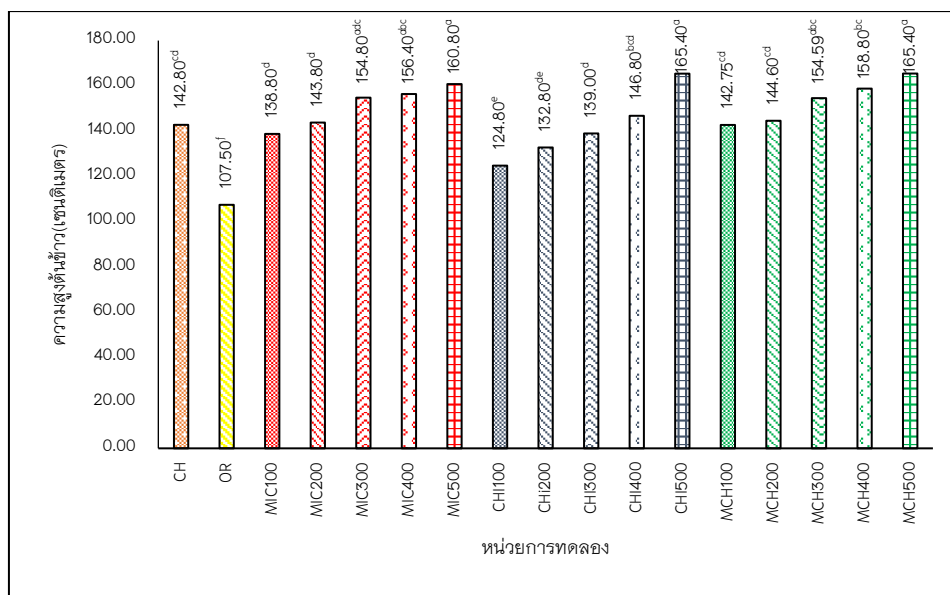
ในระยะ Ripening Phase การทดลอง MCH200- MCH500, MIC200- MCH500
และ CHI200- CHI500 มีความสูงของต้นข้าวเฉลี่ยมากที่สุด อยู่ในช่วง 144.60 ± 4.51 -
 160.80 ± 4.66 cm รองลงมา ได้แก่ CH มีค่าเท่ากับ 142.80 ± 8.88 cm ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่า
MCH100, MIC100 MIC200 และ CHI100-CHI300 (142.75 ± 3.77 138.80 ± 5.72 139.75 ± 4.99
และ 124.80 ± 1.88 - 139.00 ± 3.59 cm) ร้อยละ 0.04 - 12.61 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่าง
มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพ 29 ข้อมูลความสูงของต้นข้าว: Vegetative Phase



ภาพ 30 ข้อมูลความสูงของต้นข้าว: Reproductive Phase

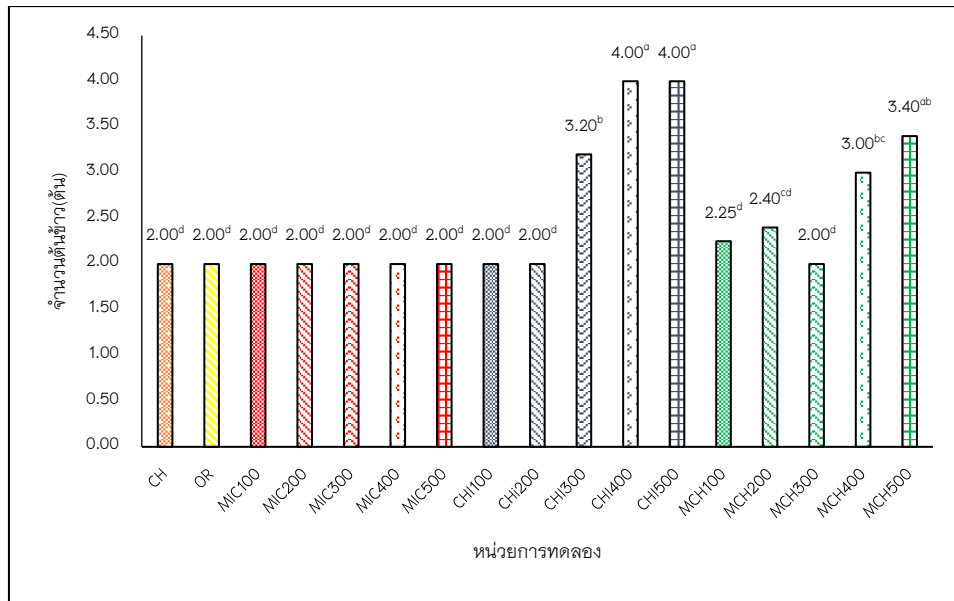


ภาพ 31 ข้อมูลความสูงของต้นข้าว: Ripening Phase

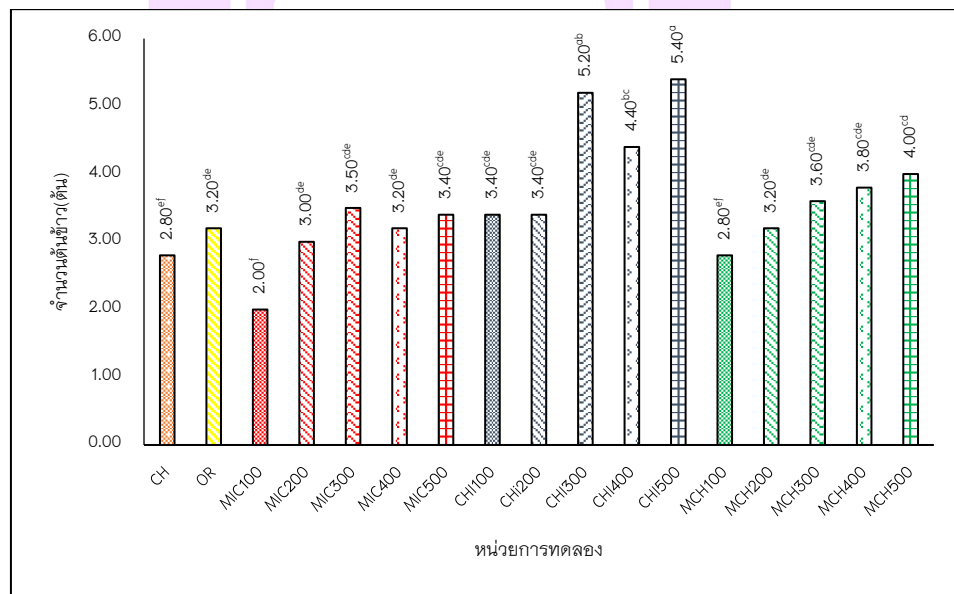
จากตาราง 36 ข้อมูลจำนวนต้น (ภาคผนวก ค) และ ภาพ 32–34 ข้อมูลจำนวนต้น พบว่า ในระยะ Vegetative Phase การทดลอง OR และ CH มีค่าเฉลี่ยจำนวนต้น เท่ากับการทดลอง MIC100–MIC500, CH100–CH200, MCH100–MCH300 คือ 2.00 ± 0.00 ต้น ซึ่งมีค่าเฉลี่ยจำนวนต้นน้อยกว่า MCH200–MCH500 และ CH300–CH500 ที่มีค่าเฉลี่ยจำนวนต้นระหว่าง 2.40 ± 0.24 – 4.00 ± 0.00 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ระยะ Reproductive Phase การทดลอง OR (3.20 ± 0.37 ต้น) และ CH (2.80 ± 0.379 ต้น) มีค่าเฉลี่ยจำนวนต้น น้อยกว่าการทดลอง MIC300–MIC500, CH100–CH200, MCH200–MCH300 คือ 2.00 ± 0.00 ต้น โดยมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 3.20 ± 0.20 – 5.40 ± 0.40 ต้น และ CH200 มีค่าเฉลี่ยจำนวนต้น มากที่สุด คือ 5.40 ± 0.40 ต้น และมากกว่า OR และ CH คิดเป็นร้อยละ 40.74 และ 48.15 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

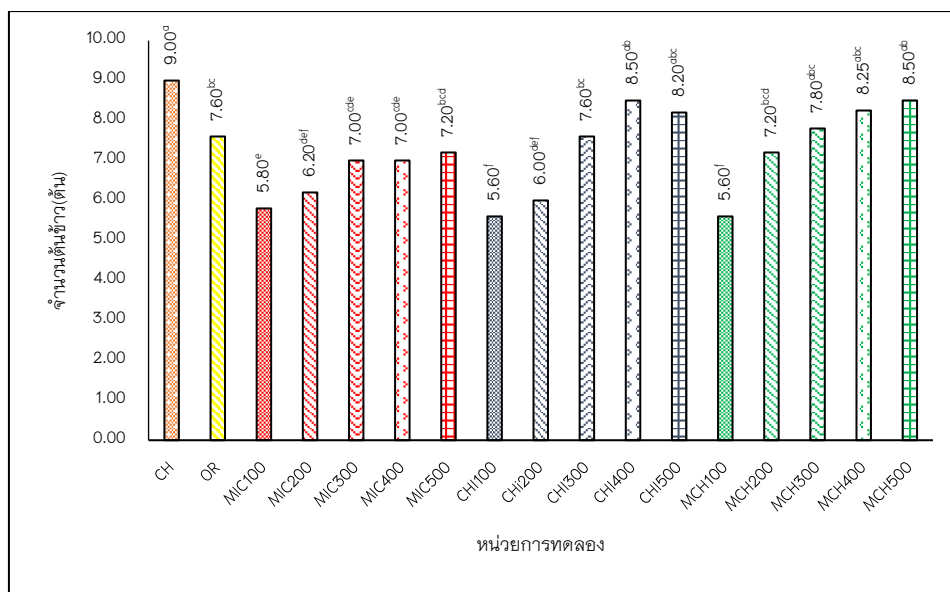
ระยะ Ripening Phase การทดลอง CH (9.00 ± 0.00 ต้น) มีค่าเฉลี่ยจำนวนต้น มากที่สุดและมากกว่าการทดลอง CH300–CH500, MCH300–MCH500 โดยมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 7.60 ± 0.24 – 8.50 ± 0.29 ต้น คิดเป็นร้อยละ 15.56 – 5.56 ซึ่งมีจำนวนต้นเฉลี่ยมากกว่า OR (7.60 ± 0.40 ต้น) ขณะที่ OR มีค่าเฉลี่ยจำนวนต้นมากกว่า MIC100– MIC500, MCH100– MCH200 และ CH100– CH200 มีค่าระหว่าง 5.60 ± 0.40 – 7.20 ± 0.37 ต้น คิดเป็นร้อยละ 5.26 – 26.32 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพ 32 ข้อมูลจำนวนต้น : Vegetative Phase



ภาพ 33 ข้อมูลจำนวนต้น : Reproductive Phase

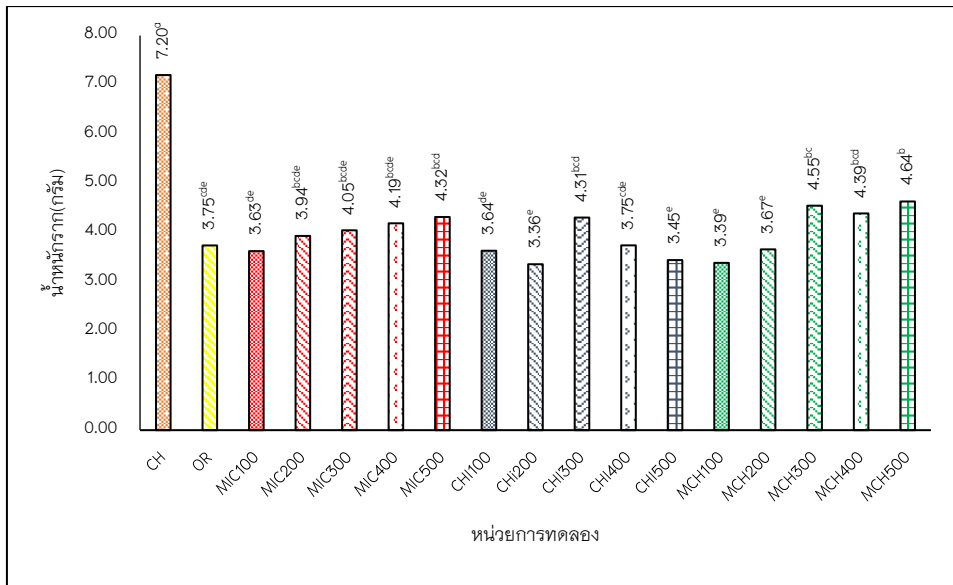


ภาพ 34 ข้อมูลจำนวนต้น : Ripening Phase

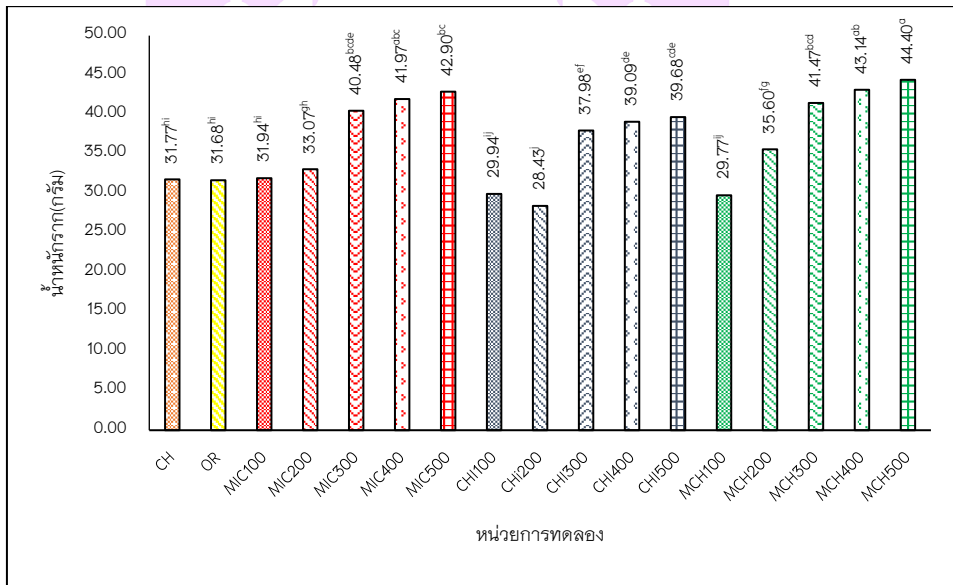
จากตาราง 37 ข้อมูลน้ำหนักรวงข้าว (ภาคผนวก ค) และ ภาพ 35-37 ข้อมูลน้ำหนักรวงข้าว พบว่าในระยะ Vegetative Phase การทดลอง CH มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักรวงข้าวมากที่สุดเท่ากับ 7.20 ± 0.00 g. และมีค่ามากกว่า MIC200-MIC500, CHI300-CHI400, MCH300-MCH500 ที่มีค่าเฉลี่ยระหว่าง $3.75 \pm 0.38 - 4.64 \pm 0.15$ g. ขณะที่ OR มีค่าเฉลี่ยของน้ำหนักรวงข้าวเท่ากับ 3.75 ± 0.34 g. โดยมีค่ามากกว่า MIC100, CHI100-CHI200, MCH100- MCH200 ที่มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักข้าวระหว่าง $3.36 \pm 0.12 - 3.67 \pm 0.14$ g. ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ระยะ Reproductive Phase การทดลอง OR (31.68 ± 0.61 g.) และ CH (31.77 ± 1.12 g.) มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักรวงข้าว น้อยกว่าการทดลอง MIC300-MIC500, CHI300-CHI200, MCH200-MCH500 ที่มีค่าเฉลี่ย ระหว่าง 31.94 ± 1.01 g. - 44.40 ± 0.64 g. ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

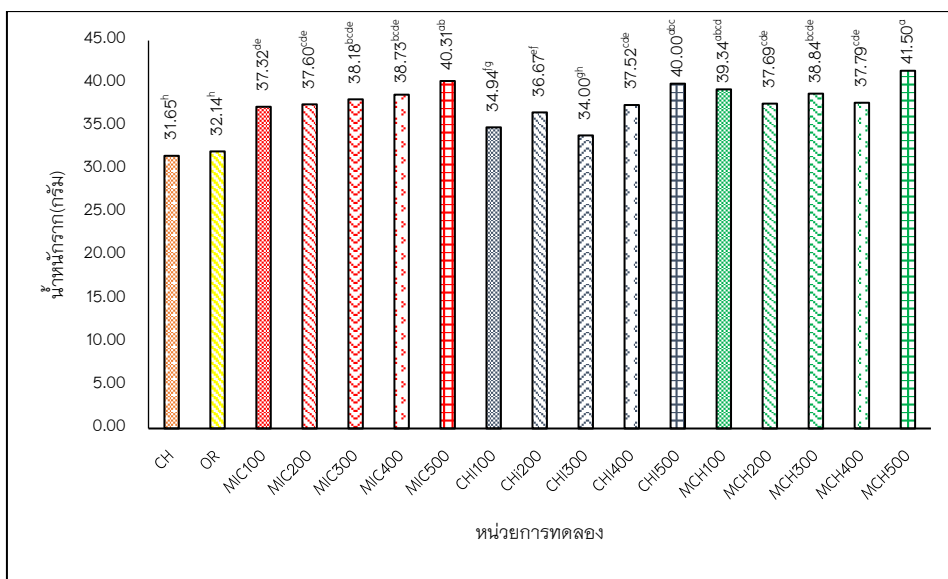
ระยะ Ripening Phase เป็นระยะที่ การทดลอง MIC100-MIC500 มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักรวงข้าว เพิ่มสูงขึ้นจากระยะอื่น ซึ่ง CH (32.32 ± 0.84 g.) OR (32.14 ± 3.60 g.) มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักรวงข้าว น้อยที่สุด ในระยะนี้ ขณะที่ MIC100-MIC500 และ MCH100-MCH500 มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน และมีค่าระหว่าง $37.32 \pm 1.06 - 40.00 \pm 0.00$ g. ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพ 35 ข้อมูลน้ำหนักรากขาว: Vegetative Phase



ภาพ 36 ข้อมูลน้ำหนักรากขาว: Reproductive Phase

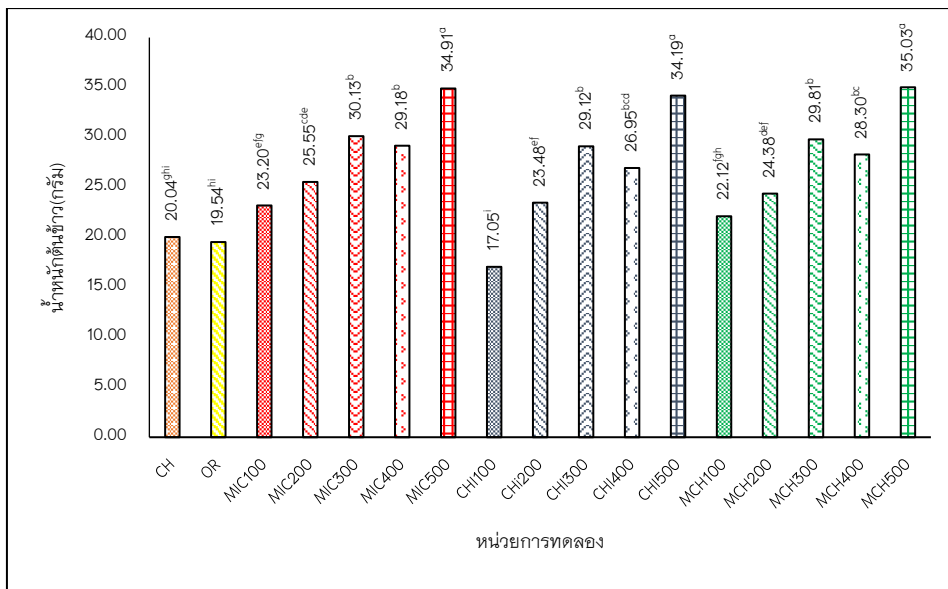


ภาพ 37 ข้อมูลน้ำหนักรากข้าว: Ripening Phase

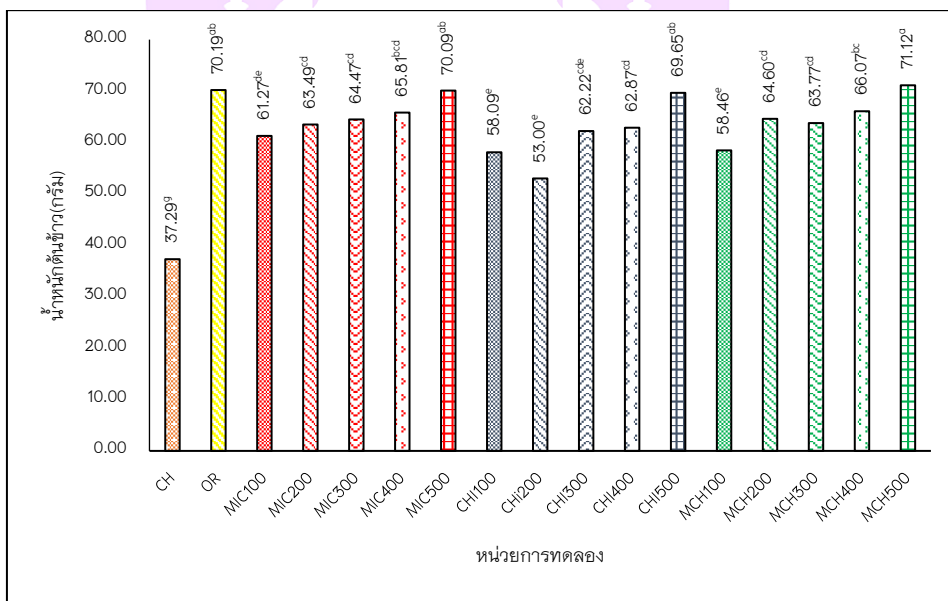
จากตาราง 38 ข้อมูลน้ำหนักรากต้นข้าว (ภาคผนวก ค) และ ภาพ 38–40 ข้อมูลน้ำหนักรากต้นข้าว พบว่าในระยะ Vegetative Phase การทดลอง CH (20.04 ± 1.74 g.) และ OR (19.54 ± 1.17 g.) มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักรากข้าวน้อยที่สุดและมีค่าน้อยกว่า MIC100–MIC500, CHI100–CHI500, MCH300–MCH500 ที่มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักรากข้าวระหว่าง 22.12 ± 0.95 – 34.91 ± 1.41 g. ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ระยะ Reproductive Phase การทดลอง OR (70.19 ± 1.91 g.) มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักรากข้าวมากที่สุด ส่วน CH (37.29 ± 1.90 g.) มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักรากข้าวน้อยที่สุด และการทดลอง MIC100–MIC500, CHI100–CHI500, MCH100–MCH500 ที่มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 53.00 ± 0.48 g. – 70.09 ± 0.56 g. ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

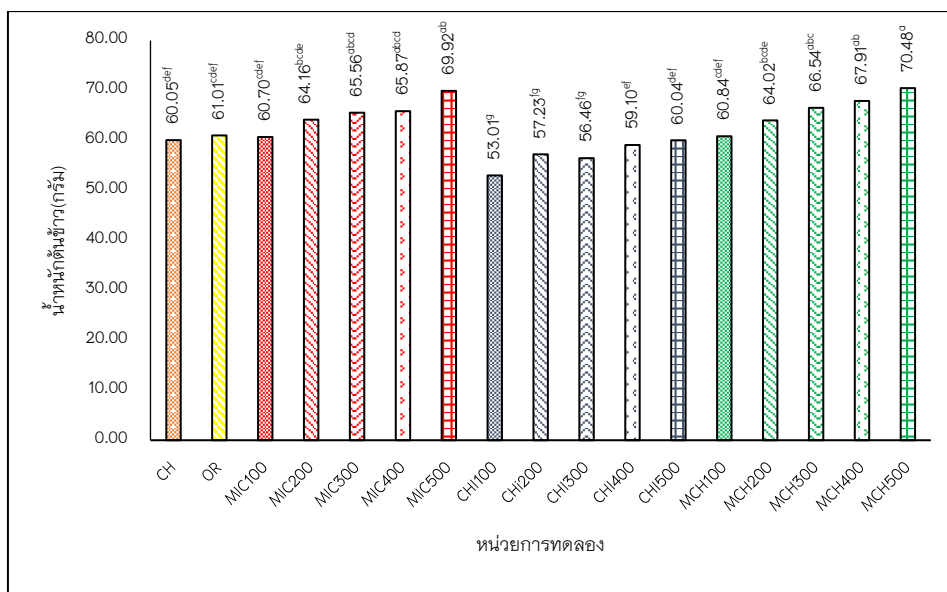
ระยะ Ripening Phase เป็นระยะที่ การทดลอง MIC100–MIC500 และ MCH100–MCH500 มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักรากข้าวระหว่าง 64.02 ± 1.13 – 70.48 ± 0.75 g. ซึ่งมากกว่า OR (61.01 ± 2.45 g.) CH (60.05 ± 2.05 g.) และ CHI100–CHI500 (53.01 ± 2.01 – 60.04 ± 2.74 g.) เป็นการทดลองที่มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักรากข้าวน้อยที่สุด ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพ 38 ข้อมูลน้ำหนักต้นข้าว: Vegetative Phase



ภาพ 39 ข้อมูลน้ำหนักต้นข้าว: Reproductive Phase

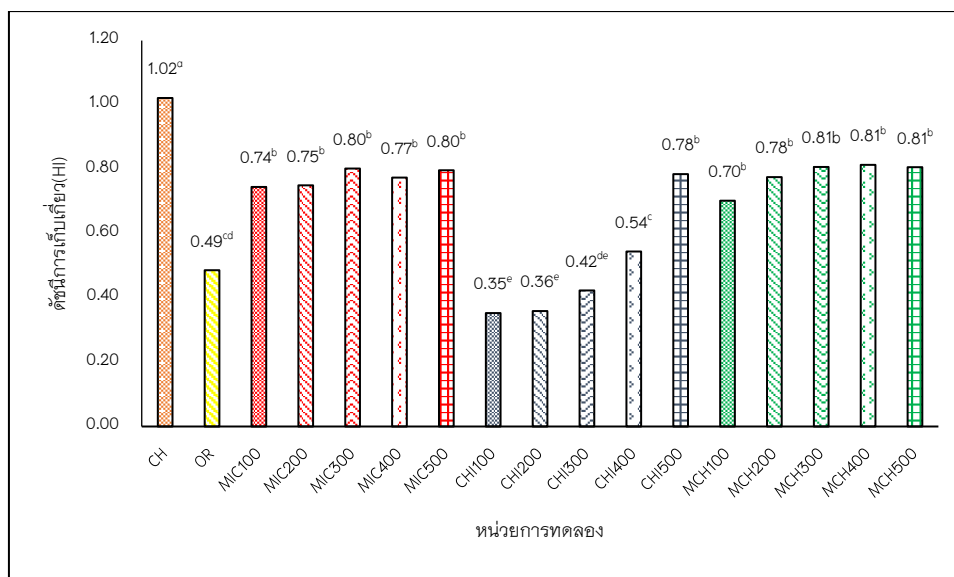


ภาพ 40 ข้อมูลน้ำหนักรีดข้าว: Ripening Phase

4. ข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest index: HI) และผลผลิตของข้าว

ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest index: HI) และผลผลิตของข้าว ได้แก่ น้ำหนักของเมล็ดข้าว จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ โดยผลการศึกษาแสดง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

จากตาราง 39 ข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest index: HI) (ภาคผนวก ค) และ ภาพ 41 ข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest index: HI) พบว่า การทดลอง CH มีค่าเฉลี่ยของดัชนีการเก็บเกี่ยว มากที่สุด เท่ากับ 1.02 ± 0.10 และ MIC300 MIC500 MCH300 MCH400 MCH500 ค่าเฉลี่ยของดัชนีการเก็บเกี่ยวใกล้เคียง คือ 0.80 ± 0.02 0.80 ± 0.01 0.81 ± 0.04 0.82 ± 0.04 และ 0.80 ± 0.049 ตามลำดับ ขณะที่ CHI100–CHI500 เป็นการทดลองที่มีค่าน้อย อยู่ในช่วง 0.35 ± 0.02 – 0.79 ± 0.05 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



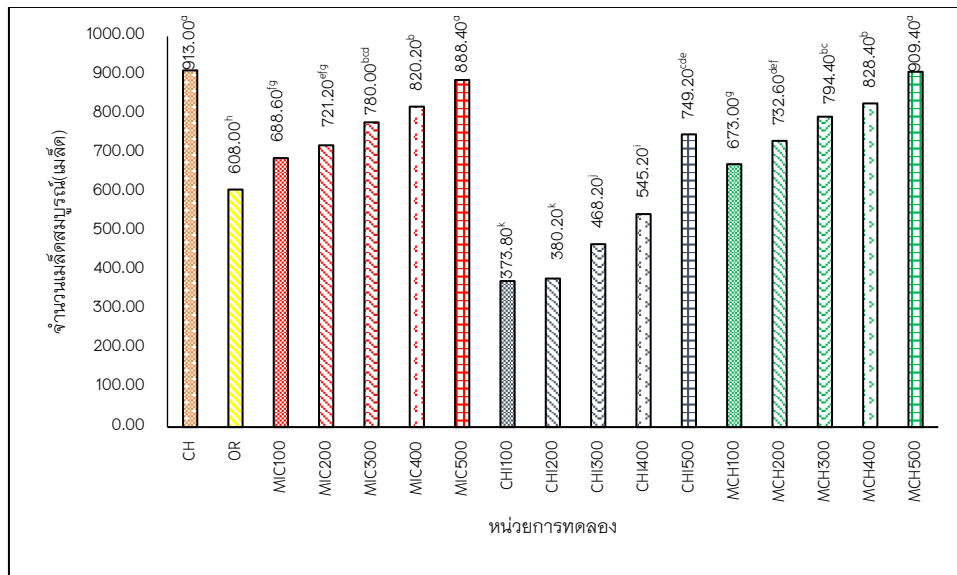
ภาพ 41 ข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest index: HI)

จากตาราง 40 (ภาคผนวก ค) ข้อมูลผลผลิตของข้าว มีการเก็บข้อมูลใน 3 ส่วน ได้แก่ จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ และน้ำหนักของเมล็ดข้าว พบว่า ด้านจำนวนเมล็ดสมบูรณ์ การทดลอง CH มีค่าเฉลี่ยจำนวนเมล็ดสมบูรณ์มากที่สุด คือ 913.00 ± 15.38 เมล็ด รองลงมาได้แก่ MCH100- MCH500 และ MIC100 -MIC500 มีค่าเฉลี่ยจำนวนเมล็ดสมบูรณ์ใกล้เคียงกัน มีค่าระหว่าง 909.40 ± 3.41 - 673.00 ± 0.58 เมล็ด ขณะที่ OR มีค่าเฉลี่ยจำนวนเมล็ดเท่ากับ 608.00 ± 2.68 เมล็ด และมีค่าเฉลี่ยจำนวนเมล็ดน้อยกว่า CH ร้อยละ 33.19 ขณะที่ CHI100- CHI400 มีค่าเฉลี่ยจำนวนเมล็ดน้อยที่สุด มีค่าระหว่าง 373.80 ± 1.00 - 545.20 ± 1.08 เมล็ด ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

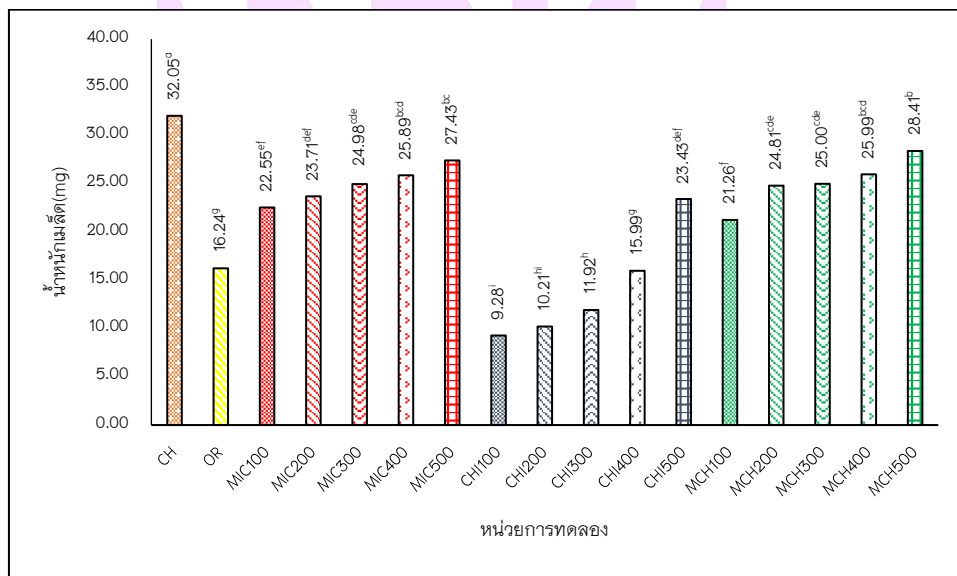
ด้านจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ พบว่าการทดลอง CH มีค่าเฉลี่ยจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์มากที่สุด คือ 142.67 ± 1.89 เมล็ด และ MIC500 มีจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์น้อยที่สุด เท่ากับ 32.40 ± 0.28 เมล็ด ขณะที่ MCH100- MCH400, MIC100 -MIC300 และ CHI100- CHI400 มีค่าระหว่าง 48.60 ± 0.63 - 62.80 ± 0.35 เมล็ด ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ด้านน้ำหนักของเมล็ดข้าว CH มีค่าเฉลี่ยจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์มากที่สุด คือ 32.05 ± 42.99 g. รองลงมาได้แก่ MCH100- MCH400 และ CHI100 -MIC400 มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักของเมล็ดข้าว ใกล้เคียงกันมีค่าระหว่าง 15.99 ± 11.26 - 22.55 ± 5.63 g. ขณะที่ OR

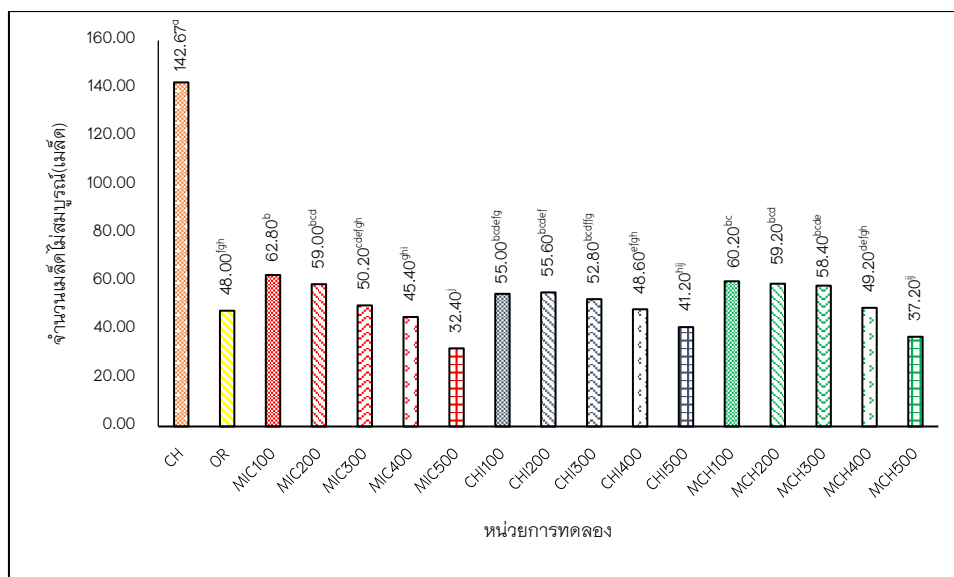
มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักของเมล็ดข้าว เท่ากับ 16.25 ± 40.63 g. ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ภาพ 42 ข้อมูลผลผลิตของข้าว: จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ Number of Full Grain



ภาพ 43 ข้อมูลผลผลิตของข้าว: น้ำหนักเมล็ด Weight of Grain



ภาพ 44 ข้อมูลผลผลิตของข้าว: จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ Grain Blighted

5. ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียม (Cd) สู่เมล็ดข้าว (Bioaccumulation factor: BAF) ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียม (Cd) สู่เมล็ดข้าว (Bioaccumulation factor: BAF) โดยผลการศึกษาแสดง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

จากตาราง 21 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียม (Cd) สู่เมล็ดข้าว (Bioaccumulation factor: BAF) เมื่อพิจารณาการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว bioaccumulation factor (BAF) แต่ละหน่วยการทดลอง ซึ่งค่า BAF จะบอกถึงความสามารถของข้าวในการเคลื่อนย้ายแคดเมียมเข้ามาสะสมในเมล็ดข้าวได้มากน้อยขนาดไหนโดยข้าวที่มีสะสมแคดเมียมได้มากจะต้องมีค่า BAF มากกว่า 1 สามารถคำนวณได้จาก (Prattana, Yotsawate and Nimnara, 2019)

$$\text{BAF} = \frac{\text{Cd concentration in grain}}{\text{Cd concentration in soil}} \quad (1)$$

พบว่าเมล็ดข้าวที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยเคมี (CH) มีการสะสมของแคดเมียมเท่ากับ 0.0072 ± 0.0001 ส่วน OR มีการสะสมของแคดเมียมเท่ากับ 0.0077 ± 0.0001 และ MIC 300 มีการสะสมของแคดเมียมมากที่สุด เท่ากับ 0.0089 ± 0.0001 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ผลจากการทดลองทุกการทดลองมีค่า BAF น้อยกว่า 1 หมายความว่า ข้าวที่ปลูกมีการเคลื่อนย้ายแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินมาสะสมในเมล็ดข้าวต่ำกว่า 1 สอดคล้องกับ สายชล และธนวรรณ (2013) ได้ศึกษาการสะสมและการกระจายของแคดเมียม

และตะกั่วในข้าวสาลีที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน พบว่าข้าวสาลีที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียมและตะกั่วมีค่า BCF น้อยกว่า 1

ตาราง 21 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียม (Cd) สู่มะลิ็ดข้าว (Bioaccumulation factor: BAF)

No.	Treatment	BAF		
		\bar{x}	C.V.	S.D.
1	CH	0.0072±0.0001 ^{ef}	0.04	0.00
2	OR	0.0077±0.0001 ^{cd}	0.04	0.00
3	MIC100	0.0074±0.0002 ^{def}	0.05	0.00
4	MIC200	0.0073±0.0000 ^{d^{ef}}	0.01	0.00
5	MIC300	0.0089±0.0001 ^a	0.04	0.00
6	MIC400	0.0081±0.0004 ^{bc}	0.10	0.00
7	MIC500	0.0073±0.0002 ^{def}	0.05	0.00
8	CHI100	0.0070±0.0001 ^f	0.02	0.00
9	CHI200	0.0060±0.0001 ^g	0.02	0.00
10	CHI300	0.0050±0.0000 ^h	0.02	0.00
11	CHI400	0.0044±0.0001 ⁱ	0.06	0.00
12	CHI500	0.0031±0.0001 ⁱ	0.05	0.00
13	MCH100	0.0072±0.0002 ^{ef}	0.05	0.00
14	MCH200	0.0073±0.0001 ^{def}	0.04	0.00
15	MCH300	0.0084±0.0001 ^b	0.03	0.00
16	MCH400	0.0085±0.0001 ^{db}	0.04	0.00
17	MCH500	0.0075±0.0002 ^{de}	0.06	0.00

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %
 ** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

6. ข้อมูลความสามารถในการเคลื่อนย้ายของแคดเมียม (Translocation Factor: TF)
 ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลความสามารถในการเคลื่อนย้ายของแคดเมียม (Translocation Factor: TF) โดยผลการศึกษาแสดง ดังรายละเอียดต่อไปนี้
 จากตาราง 22 ข้อมูลความสามารถในการเคลื่อนย้ายของแคดเมียม (Translocation Factor: TF) เมื่อพิจารณาความสามารถในการเคลื่อนย้ายของแคดเมียม (Translocation Factor: TF)

แต่ละหน่วยการทดลอง ซึ่งค่า TF เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถของพืชในการลำเลียงแคดเมียมจากรากสู่ ใบ และ เมล็ดข้าว ซึ่งพืชที่มีค่า TF > 1 หมายความว่า พืชสามารถเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากไปสะสมยังส่วนต่าง ๆ ที่อยู่เหนือพื้นดินได้ดี

ตาราง 22 ข้อมูลความสามารถในการเคลื่อนย้ายของแคดเมียม (Translocation Factor: TF)

No.	Treatment	Translocation Factor (TF)								
		Soil-roots			Roots-Shoots			Shoots-Grains		
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	CH	0.056±0.00 ^{de}	0.06	0.00	1.82±0.16 ^a	0.20	0.37	0.07±0.01 ^{ns}	0.23	0.02
2	OR	0.055±0.00 ^{def}	0.10	0.00	1.46±0.08 ^{bc}	0.13	0.19	0.09±0.00 ^{ns}	0.07	0.00
3	MIC100	0.047±0.00 ^f	0.07	0.00	1.60±0.05 ^{abc}	0.07	0.12	0.09±0.00 ^{ns}	0.06	0.00
4	MIC200	0.051±0.00 ^{ef}	0.02	0.00	1.58±0.07 ^{abc}	0.09	0.14	0.08±0.00 ^{ns}	0.08	0.00
5	MIC300	0.066±0.00 ^{bc}	0.17	0.01	1.53±0.16 ^{abc}	0.23	0.35	0.08±0.00 ^{ns}	0.08	0.00
6	MIC400	0.060±0.00 ^{cd}	0.11	0.01	1.30±0.12 ^{cde}	0.21	0.27	0.09±0.01 ^{ns}	0.16	0.01
7	MIC500	0.074±0.00 ^{ab}	0.06	0.00	1.14±0.03 ^{de}	0.07	0.08	0.08±0.00 ^{ns}	0.06	0.00
8	CHI100	0.065±0.00 ^{bc}	0.04	0.00	1.51 ±0.04 ^{abc}	0.06	0.10	0.07±0.00 ^{ns}	0.06	0.00
9	CHI200	0.067±0.00 ^{bc}	0.08	0.01	1.52 ±0.04 ^{abc}	0.06	0.10	0.06±0.00 ^{ns}	0.08	0.01
10	CHI300	0.060±0.00 ^{cd}	0.07	0.00	1.67±0.07 ^{ab}	0.09	0.15	0.05±0.00 ^{ns}	0.03	0.00
11	CHI400	0.056±0.00 ^{de}	0.15	0.01	1.71±0.08 ^{ab}	0.11	0.19	0.04±0.00 ^{ns}	0.09	0.00
12	CHI500	0.055±0.00 ^{def}	0.08	0.00	0.63±0.19 ^f	0.67	0.42	0.05±0.46 ^{ns}	1.92	1.03
13	MCH100	0.047±0.00 ^f	0.02	0.00	1.66 ±0.03 ^{ab}	0.04	0.06	0.09±0.00 ^{ns}	0.05	0.01
14	MCH200	0.052±0.00 ^{def}	0.06	0.00	1.74±0.10 ^{ab}	0.13	0.21	0.08±0.00 ^{ns}	0.07	0.01
15	MCH300	0.068 ±0.00 ^{bc}	0.14	0.01	1.69±0.11 ^{ab}	0.14	0.24	0.07±0.00 ^{ns}	0.06	0.00
16	MCH400	0.059±0.00 ^{cde}	0.10	0.006	1.43±0.10 ^{bcd}	0.15	0.22	0.09±0.00 ^{ns}	0.12	0.01
17	MCH500	0.077±0.00 ^a	0.13	0.010	1.06±0.08 ^e	0.18	0.20	0.09±0.00 ^{ns}	0.13	0.01

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธี

Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

การหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อน แม่ตา

1. ข้อมูลสมบัติของดินก่อนการทดลอง

ผู้วิจัยรวบรวมข้อมูลสมบัติของดินก่อนการทดลองทั้งข้อมูลสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีของดิน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบในการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติของดิน ระหว่าง และหลังการทดลอง ดังข้อมูลต่อไปนี้

1.1 ข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพของดินก่อนการทดลอง

ผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของดินก่อนการทดลอง ประกอบด้วย ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อนุภาคดิน (Soil particles) เนื้อดิน (Soil Texture) โดยดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินปนเปื้อนแคดเมียมจากพื้นที่ นาข้าว ตำบลแม่ตา อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของดิน พบว่าดินในพื้นที่ดังกล่าวมีความหนาแน่นของดิน เท่ากับ 1.117 kg/cm^3 ค่าการนำไฟฟ้า เท่ากับ $28.00 \mu\text{S}$ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.41 อนุภาคดิน ประกอบด้วย ดินทราย 22.88 % ดินร่วน 36.00 % ดินเหนียว 41.12 % และลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง (Silty clay) ดังตาราง 23 ข้อมูลสมบัติทางกายภาพของดินก่อนการทดลอง

ตาราง 23 ข้อมูลสมบัติทางกายภาพของดินก่อนการทดลอง

Soil Physic	\bar{x}	
Electrical Conductivity (μS)	28.00	
pH	5.41	
Soil particles (%)	Sand	22.88
	Silt	36.00
	Clay	41.12
Soil Texture	Silty clay	

1.2 ข้อมูลสมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง

ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลสมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง ประกอบด้วย ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic Matter : OM) ปริมาณธาตุอาหารพืช ได้แก่ ไนโตรเจน (Nitrogen : N) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available Phosphorus : P) ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Available Potassium : K) และปริมาณแคดเมียมในดิน (Cadmium : Cd) โดยดิน

ที่ใช้ในการทดลองเป็นดินปนเปื้อนแคดเมียมจากพื้นที่นาข้าว ตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน พบว่ามีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน เท่ากับ 30.49 mg/kg ปริมาณธาตุอาหารพืช ได้แก่ ไนโตรเจน เท่ากับ 4.53 g/kg ฟอสฟอรัส เท่ากับ 1.20 g/kg โพแทสเซียม เท่ากับ 38.52 g/kg และปริมาณโลหะหนักแคดเมียม มีค่าเท่ากับ 89.35 mg/kg ดังตาราง 24 ข้อมูลสมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง

ตาราง 24 ข้อมูลสมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง

Soil chemistry	\bar{x}
Organic matter (g/kg)	30.49
Nitrogen (g/kg)	4.53
Available phosphorus (mg/kg)	1.20
Available potassium (mg/kg)	38.52
Cadmium (mg/kg)	89.35

2. ข้อมูลคุณสมบัติของดินระหว่างการทดลอง

ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลคุณสมบัติทางเคมีของดินระหว่างการทดลอง ตามระยะการเจริญของพืช ใน 3 ระยะ คือ ระยะการเจริญทางลำต้น (Vegetative Phase) ระยะการเจริญทางการสืบพันธุ์ (Reproductive Phase) ระยะการเจริญในการสร้างเมล็ด (Ripening Phase) ประกอบด้วย ปริมาณแคดเมียมในดิน (Cadmium : Cd) ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic Matter : OM) ปริมาณธาตุอาหารพืช ได้แก่ ไนโตรเจน (Nitrogen : N) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available Phosphorus : P) และปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Available Potassium : K) โดยผลการศึกษาแสดง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ข้อมูลปริมาณแคดเมียมในดิน

ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลปริมาณแคดเมียมในดินของโมเดลที่มีการปลูกพืช และไม่ปลูกพืช เพื่อเปรียบเทียบการลดลงของแคดเมียมในดิน พบว่าปริมาณแคดเมียมในดินมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและลดลงอย่างต่อเนื่องจากระยะ Vegetative Phase Reproductive Phase และลดลงมากที่สุดในระยะ Ripening Phase โดยปริมาณแคดเมียมในดินการทดลองดินที่ใช้ปุ๋ยเคมี (CHEM) มีค่ามากที่สุด รองลงมาได้แก่ ดินแม่ตาว (P-T) ดินที่เติมสารชีวภัณฑ์ ปริมาณ 300 ml/น้ำ 200 L/rai (MIC300) และดินที่เติมสารชีวภัณฑ์ ปริมาณ 500 ml น้ำ 200 L/rai (MIC500) มีรายละเอียดดังนี้

เมื่อพิจารณาถึงการสะสมของแคดเมียมในดินที่ไม่มีการปลูกข้าว ปริมาณการสะสมของแคดเมียมในดินที่ไม่มีการปลูกข้าว พบว่าขณะเริ่มการเพาะปลูกหรือระยะ Vegetative Phase มีปริมาณแคดเมียมอยู่ในช่วง 64–88 mg/kg โดย P-T CHEM MIC500 และ MIC300 มีแนวโน้มลดลงซึ่ง CHEM มีปริมาณแคดเมียมมากที่สุด คือ 87.51 ± 0.25 mg/kg

อย่างไรก็ตามระหว่าง Reproductive Phase และ Ripening Phase เป็นระยะที่ดินมีการลดลงของแคดเมียมมากที่สุด เช่นเดียวกับชุดทดลองที่มีการปลูกข้าว โดย MIC300 และ MIC500 ลดลงร้อยละ 11.19 และ 12.10 (44.66 ± 0.55 และ 33.14 ± 0.47 mg/kg) ในขณะที่ P-T และ CHEM ลดลงเพียงร้อยละ 1.04 และ 2.55 (73.30 ± 1.39 และ 79.50 ± 0.47 mg/kg) เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมในดินขณะเริ่มการเพาะปลูกจนถึงระยะการเก็บเกี่ยว (Ripening Phase) นั้น พบว่า MIC300 และ MIC500 ลดลงร้อยละ 50.02 และ 62.91 ซึ่งหน่วยการทดลอง CHEM และ P-T ลดลงเพียง ร้อยละ 17.96 และ 11.02 เมื่อสิ้นสุดระยะการเพาะปลูกคือ 120 วัน พบปริมาณแคดเมียมใน MIC500 มีค่าเท่ากับ 33.14 ± 0.47 mg/kg ซึ่งมีค่าอยู่ในมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม(ต้องไม่เกิน 37 mg/kg) ในขณะที่ MIC300, P-T และ CHEM มีค่าเท่ากับ 44.66 ± 0.55 73.30 ± 1.39 และ 79.50 ± 0.47 mg /kg ที่มีค่าเกินมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม

เมื่อเปรียบเทียบ ปริมาณแคดเมียมในดิน จากการทดลองที่ปลูกข้าว และไม่ปลูกข้าว นั้น พบว่า การทดลองที่ปลูกข้าว และไม่ปลูกข้าวมีแนวโน้มปริมาณแคดเมียมในดินไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 4 การทดลอง และลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการปลูกข้าว ทั้งนี้ โมเดลที่มีการปลูกข้าวมีปริมาณแคดเมียมในดินลดลงมากกว่าเนื่องจากมีการใช้ไปของพืช ซึ่งในระยะ Vegetative Phase ระหว่างโมเดลที่ปลูกข้าวลดลงมากกว่าโมเดลไม่ปลูกข้าว ในการทดลอง MIC500 คิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0.95 เท่า รองลงมาได้แก่ MIC300 P-T และ CHEM เท่ากับ 0.94 0.93 และ 0.91 เท่า ตามลำดับ

ระยะ Reproductive Phase ในการทดลอง MIC500 คิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0.99 เท่า รองลงมาได้แก่ MIC300 P-T และ CHEM เท่ากับ 0.92 0.90 และ 0.72 เท่า ตามลำดับ

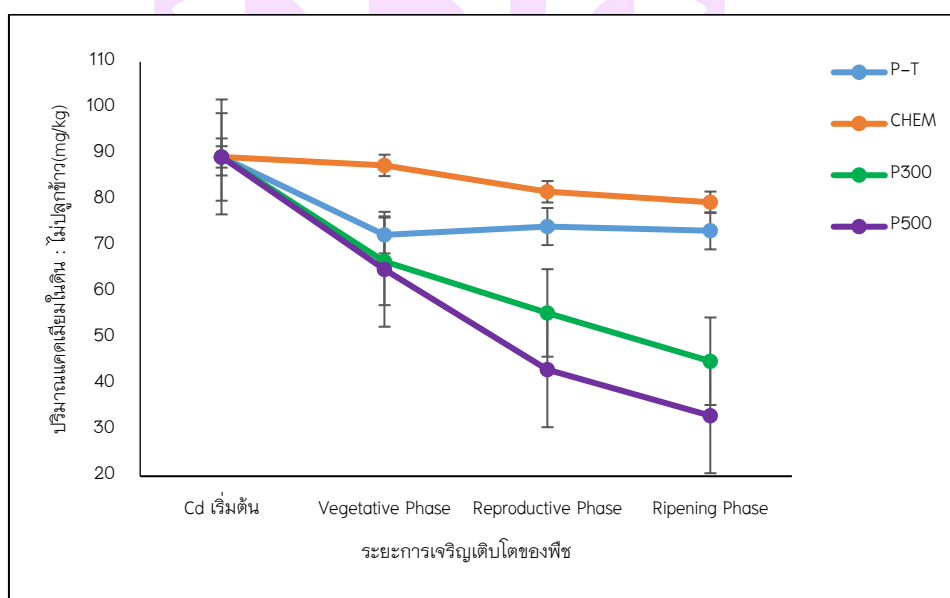
ระยะ Ripening Phase ในการทดลอง MIC500 คิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0.99 เท่า รองลงมาได้แก่ MIC300 P-T และ CHEM เท่ากับ 0.78 0.76 และ 0.67 เท่า ตามลำดับ

และจากค่าเฉลี่ยพบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ $p < 0.05$ โดยการทดลองที่ไม่ปลูกพืช นั้น ปริมาณแคดเมียมในดินยังคงลดลงใน 4 การทดลอง ตามระยะการเจริญของพืช ดังตาราง 41 ข้อมูลปริมาณแคดเมียมในดิน : ไม่ปลูกข้าว (ภาคผนวก ค)

และภาพ 45 ปริมาณแคดเมียมในดิน : ไม่ปลูกข้าว โดยปริมาณแคดเมียมในดินทั้ง 3 ระยะ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 33.14 mg/kg – 87.51 mg/kg พบว่าโมเดลที่ไม่ปลูกพืช ในระยะ Vegetative Phase การทดลอง CHEM มีปริมาณแคดเมียมในดินมากที่สุด เท่ากับ 87.51 ± 0.25 mg/kg รองลงมาได้แก่ P-T MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 72.42 ± 0.03 66.67 ± 0.78 และ 64.95 ± 1.73 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ระยะ Reproductive Phase การทดลอง CHEM มีปริมาณแคดเมียมในดินมากที่สุด เท่ากับ 81.78 ± 0.61 mg/kg รองลงมาได้แก่ P-T MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 74.23 ± 0.75 55.47 ± 0.52 และ 43.14 ± 1.07 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ส่วนระยะ Ripening Phase เป็นระยะที่มีปริมาณแคดเมียมเหลืออยู่ในดินน้อยที่สุด พบว่าการทดลอง CHEM มีปริมาณแคดเมียมในดินมากที่สุด เท่ากับ 79.50 ± 0.47 mg/kg รองลงมาได้แก่ P-T MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 73.30 ± 1.39 44.66 ± 0.55 และ 33.14 ± 0.47 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพ 45 ปริมาณแคดเมียมในดิน : ไม่ปลูกข้าว

ผลของการศึกษาสารชีวภัณฑ์ต่อการสะสมของแคดเมียมในดินที่ปลูกพืช พบว่า ปริมาณแคดเมียมในดินระยะการเจริญ (Vegetative Phase) การทดลอง CHEM มีปริมาณมากที่สุด คือ 80.00 ± 0.72 mg/kg และทุกการทดลองมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในระยะของการเจริญเติบโตของข้าวระหว่าง Reproductive Phase และ Ripening Phase เป็นระยะที่ดินมีการลดลงของแคดเมียมมากที่สุดโดย MIC500 และ MIC300 ลดลงจากเดิมร้อยละ 18.05 และ 10.71 (35.02 ± 0.70 และ 32.95 ± 1.25 mg/kg) ในขณะที่ P-T และ CHEM ลดลงร้อยละ 4.95 (49.02 ± 0.43 และ 60.49 ± 0.78 mg/kg) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมในดินขณะเริ่มการเพาะปลูกจนถึงระยะการเก็บเกี่ยว (Ripening Phase) นั้น พบว่า MIC500 และ MIC300 ลดลงจากเดิมร้อยละ 63.12 และ 60.81 ซึ่งลดลงมากกว่า P-T และ CHEM ถึง 2 เท่า (ร้อยละ 45.14 และ 32.30) เมื่อสิ้นสุดระยะการเพาะปลูกคือ 120 วัน พบปริมาณแคดเมียมใน MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 35.02 ± 0.70 และ 32.95 ± 1.25 mg/kg ซึ่งมีค่าอยู่ในมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ต้องไม่เกิน 37 mg/kg) ในขณะที่ P-T และ P-CHEM มีค่าเท่ากับ 49.02 และ 60.49 mg/kg ที่มีค่าเกินมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม

และจากค่าเฉลี่ยพบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ $p \leq 0.05$ โดยการทดลองที่มีการปลูกพืช พบว่าระยะ Vegetative Phase การทดลอง CHEM มีปริมาณแคดเมียมในดินมากที่สุด เท่ากับ 80.00 ± 0.72 mg/kg รองลงมาได้แก่ P-T MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 67.65 ± 0.78 62.71 ± 0.89 และ 61.90 ± 1.91 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Reproductive Phase การทดลอง CHEM มีปริมาณแคดเมียมในดินมากที่สุด เท่ากับ 73.47 ± 0.79 mg/kg รองลงมาได้แก่ P-T MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 53.44 ± 0.84 51.15 ± 0.71 และ 42.52 ± 0.61 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ส่วนระยะ Ripening Phase เป็นระยะที่มีปริมาณแคดเมียมเหลืออยู่ในดินน้อยที่สุด พบว่า การทดลอง CHEM มีปริมาณแคดเมียมในดินมากที่สุด เท่ากับ 60.49 ± 0.78 mg/kg รองลงมาได้แก่ P-T MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 49.02 ± 0.43 35.02 ± 0.70 และ 32.95 ± 1.25 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

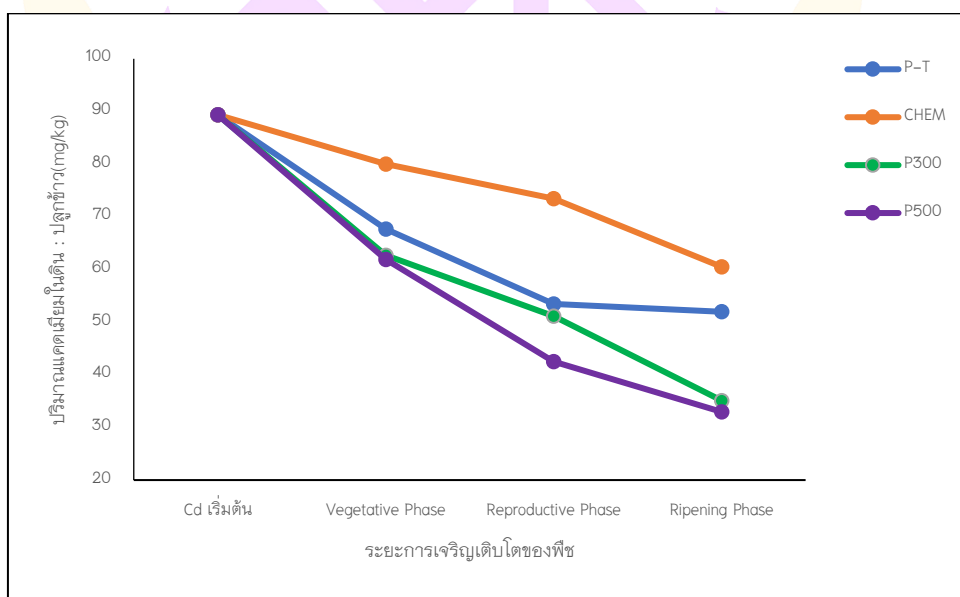
เมื่อพิจารณาจากภาพ 46 ปริมาณแคดเมียมในดิน : ปลูกข้าว พบว่า ดินที่ใช้ปุ๋ยเคมี (CHEM) มีปริมาณแคดเมียมในดินตลอดระยะการเจริญเติบโตของพืชที่สุด รองลงมาคือ

รองลงมาได้แก่ ดินแม่ตาว (P-T) ดินที่เติมสารชีวภัณฑ์ปริมาณ 300 ml/น้ำ 200 L/rai (MIC300) และ ดินที่เติมสารชีวภัณฑ์ปริมาณ 500 ml น้ำ 200 L/rai (MIC500) พบว่า ปริมาณแคดเมียมในดินจะลดลงมากที่สุดในช่วงระยะ Vegetative Phase ถึง ระยะ Reproductive Phase ซึ่งเป็นระยะที่พืชมีการเจริญเติบโตโดยการใช้อาหารจากดินในการสร้างราก ลำต้น จนถึงการสร้างดอกและเมล็ด จึงทำให้ปริมาณแคดเมียมในดินลดลงมากที่สุดในระยะการเจริญดังกล่าว ลดลงมากถึง 0.70-0.90 เท่า

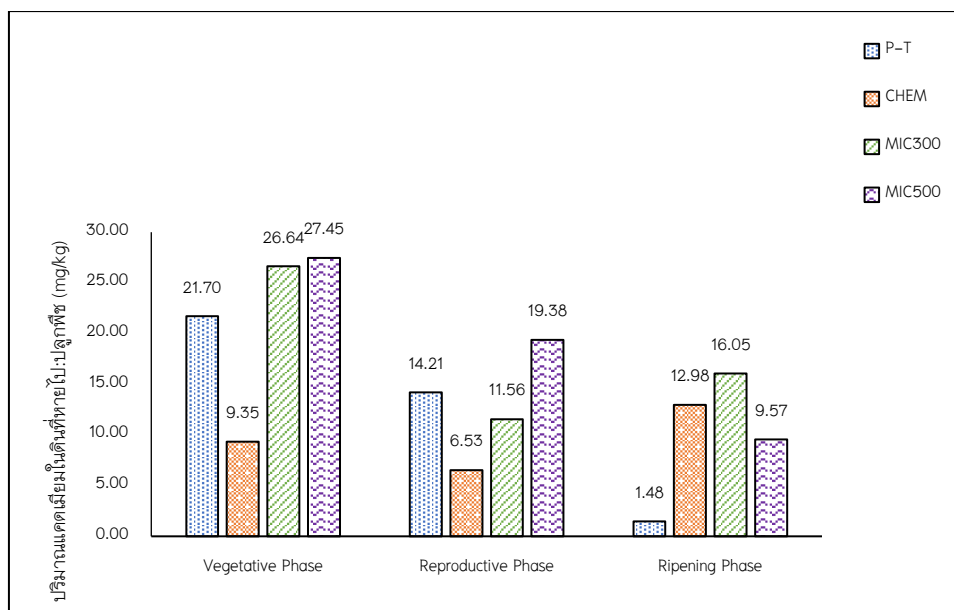
ประกอบกับภาพ 47 ปริมาณแคดเมียมในดินที่หายไป พบว่าในระยะVegetative Phase การทดลอง MIC500 ปริมาณแคดเมียมที่หายไป มากที่สุดเท่ากับ 27.45 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC300 P-T และ CHEM มีค่าเท่ากับ 26.64 21.70 และ 9.35 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Reproductive Phase พบว่าการทดลอง MIC500 ปริมาณแคดเมียมที่หายไป มากที่สุดเท่ากับ 19.38 mg/kg รองลงมาได้แก่ P-T MIC300 และ CHEM มีค่าเท่ากับ 14.21 11.56 และ 6.53 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Ripening Phase พบว่าการทดลอง MIC300 ปริมาณแคดเมียมที่หายไป มากที่สุดเท่ากับ 16.05 mg/kg รองลงมาได้แก่ CHEM MIC500 และP-T มีค่าเท่ากับ 12.98 9.57 และ 1.48 mg/kg ตามลำดับ เป็นไปได้ว่าในระยะที่ข้าวตั้งท้อง ต้องใส่ปุ๋ย เพื่อช่วยในการออกดอกและการสร้างเมล็ดนั้น การเติมปุ๋ยฟอสเฟตในดินทำให้ประจุลบของ PO_4^{3-} ดึงดูดกับประจุบวกของ Cd^{2+} จึงทำให้ ปริมาณแคดเมียมที่หายไปในการทดลอง CHEM มากกว่าการทดลอง MIC500 และP-T ได้



ภาพ 46 ปริมาณแคดเมียมในดิน : ปลูกร้าง



ภาพ 47 ปริมาณแคดเมียมในดินที่หายไป

2.2 ข้อมูลปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

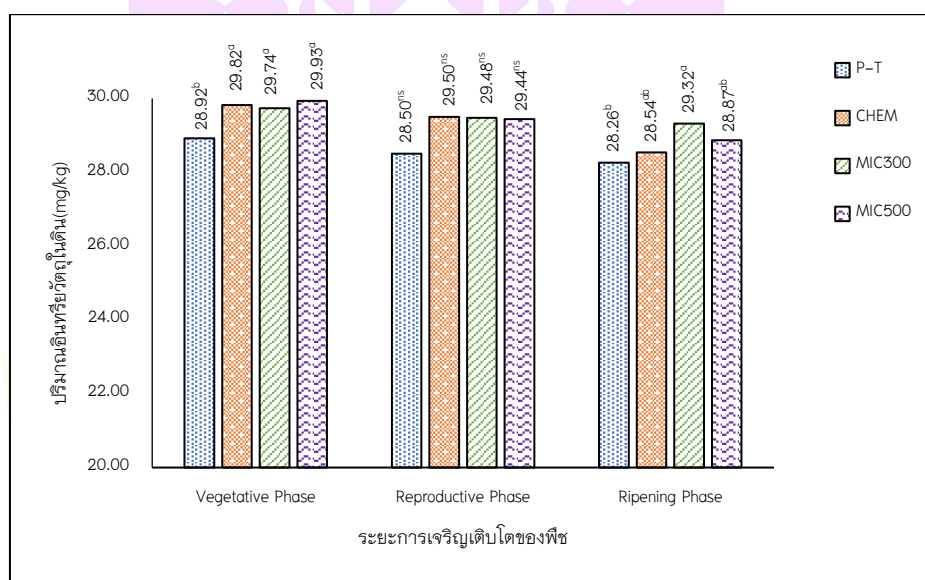
ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินของโมเดลที่ไม่ปลูกพืช และไม่ปลูกพืช พบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและลดลงอย่างต่อเนื่องจากระยะ Vegetative Phase Reproductive Phase และลดลงมากที่สุดในระยะ Ripening Phase โดยปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินทั้ง 3 ระยะการเจริญเติบโตมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 25.00 mg/kg – 29.00 mg/kg ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูง (MH) (25–35 mg/kg) ตามการประเมินระดับสมบัติทางเคมี และการประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน (Land Classification Division และ FAO Project Staff, 1973; Soil Survey Division Staff, 1993) มีรายละเอียดของผลการศึกษาดังนี้

การทดลองที่ไม่ปลูกพืชนั้น ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินลดลงใน 4 การทดลองตามระยะการเจริญของพืช ดังตาราง 43 ข้อมูลปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน : ไม่ปลูกข้าว (ภาคผนวก ค) และภาพ 48 ข้อมูลปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน : ไม่ปลูกข้าวโดยปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ทั้ง 3 ระยะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 28.00 mg/kg – 30.00 mg/kg ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูง (MH) (25–35 mg/kg) ตามการประเมินระดับสมบัติทางเคมี และการประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน (Land Classification Division และ FAO Project Staff, 1973; Soil Survey Division Staff, 1993) ผลการศึกษาพบว่าโมเดลที่ไม่ปลูกพืช ในระยะ Vegetative Phase การทดลอง MIC500 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน มากที่สุด เท่ากับ 29.93 ± 0.23 mg/kg

รองลงมาได้แก่ CHEM MIC300 และ P-T มีค่าเท่ากับ 29.82 ± 0.00 29.74 ± 0.00 และ 28.65 ± 0.32 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Reproductive Phase การทดลอง CHEM มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมากที่สุด เท่ากับ 29.50 ± 0.00 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC300 MIC500 และ P-T มีค่าเท่ากับ 29.48 ± 0.00 29.44 ± 0.00 และ 28.50 ± 0.00 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Ripening Phase เป็นระยะที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน เหลืออยู่ในดินน้อยที่สุด พบว่าการทดลอง MIC300 มีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมากที่สุด เท่ากับ 29.32 ± 0.00 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC500 CHEM และ P-T มีค่าเท่ากับ 28.87 ± 0.00 28.54 ± 0.00 และ 28.26 ± 0.36 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

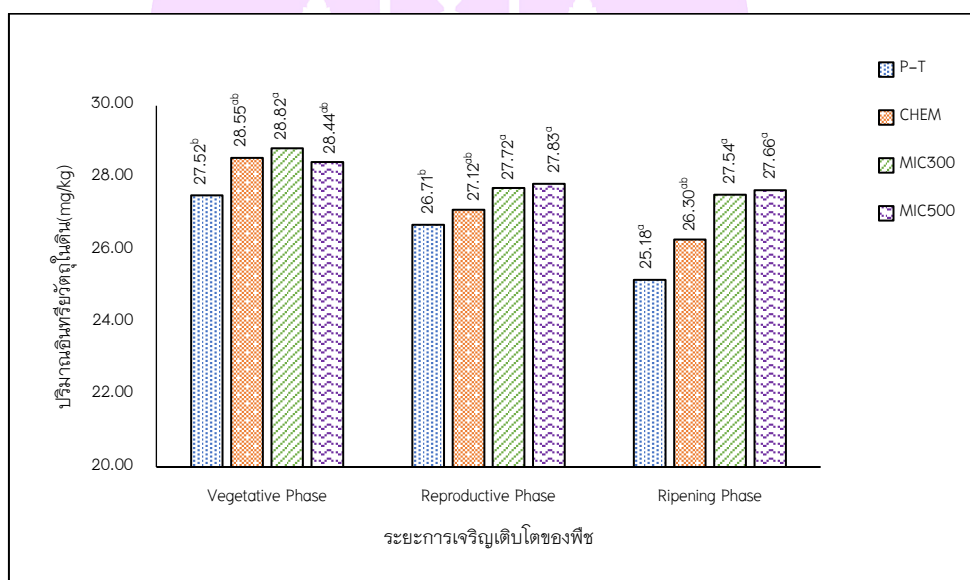


ภาพ 48 ข้อมูลปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน : ไม่ปลูกข้าว

จากตาราง 44 ข้อมูลปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน : ปลูกข้าว (ภาคผนวก ค) และภาพ 49 ข้อมูลปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน : ปลูกข้าว ระยะ Vegetative Phase พบว่า MIC300 มีค่าเฉลี่ยปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมากที่สุด เท่ากับ 28.82 ± 0.56 mg/kg รองลงมาได้แก่ CHEM MIC500 P-T มีค่าเฉลี่ยปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 28.55 ± 0.28 28.44 ± 0.09 และ 27.52 ± 0.19 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ระยะ Reproductive Phase พบว่า MIC500 มีค่าเฉลี่ยปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมากที่สุดเท่ากับ 27.83 ± 0.00 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC300 CHEM P-T มีค่าเฉลี่ยปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 27.72 ± 0.58 27.1 ± 20.52 และ 26.71 ± 0.74 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ระยะ Ripening Phase พบว่า MIC500 มีค่าเฉลี่ยปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมากที่สุดเท่ากับ 27.66 ± 0.00 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC300 CHEM P-T มีค่าเฉลี่ยปริมาณอินทรีย์วัตถุเท่ากับ 27.54 ± 0.00 26.30 ± 0.33 และ 25.18 ± 0.67 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพ 49 ข้อมูลปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน : ปลุกข้าว

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินจากการทดลองในโมเดลที่ปลุกข้าวและไม่ปลุกข้าว พบว่า โมเดลที่ปลุกข้าว และไม่ปลุกข้าวมีแนวโน้มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 4 การทดลอง และลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการปลุกข้าว ทั้งนี้โมเดลที่มีการปลุกข้าวมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินลดลงมากกว่าเนื่องจากมีการใช้ไปของพืช ซึ่งในระยะ Vegetative Phase ระหว่างโมเดลที่ปลุกข้าวลดลงมากกว่าโมเดลไม่ปลุกข้าว ในการทดลอง MIC300 คิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0.97 เท่า รองลงมาได้แก่ P-T และ CHEM มีค่าเท่ากัน คือ 0.96 เท่า และ MIC500 เท่ากับ 0.95 เท่า

ระยะ Reproductive Phase ในการทดลอง MIC500 คิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0.95 เท่า รองลงมาได้แก่ MIC300 และ P-T มีค่าเท่ากับ 0.94 เท่า และ CHEM เท่ากับ 0.92 เท่า

ระยะ Ripening Phase ในการทดลอง MIC500 คิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0.96 เท่า รองลงมาได้แก่ MIC300 CHEM และ P-T เท่ากับ 0.94 0.92 และ 0.89 เท่า ตามลำดับ

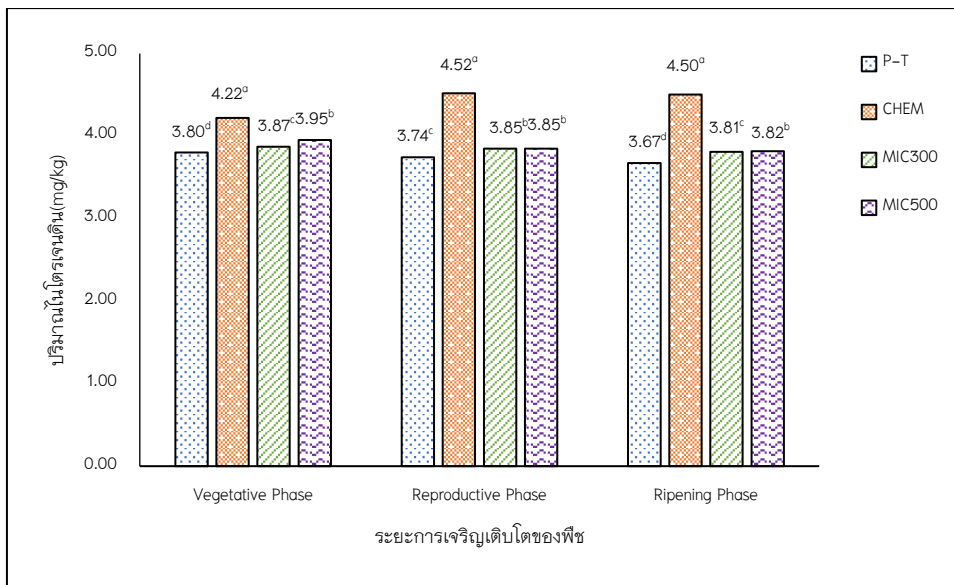
2.3 ข้อมูลปริมาณไนโตรเจนในดิน

ผู้วิจัยได้ศึกษาปริมาณไนโตรเจนในดิน ของโมเดลที่ปลูกพืช และไม่ปลูกพืช พบว่าปริมาณไนโตรเจนในดิน มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและลดลงอย่างต่อเนื่องจากระยะ Vegetative Phase Reproductive Phase และลดลงมากที่สุด ในระยะ Ripening Phase โดยปริมาณไนโตรเจนในดิน ทั้ง 3 ระยะการเจริญเติบโตมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.00 mg/kg – 4.00 mg/kg มีรายละเอียดดังนี้

การทดลองที่ไม่ปลูกพืชนั้น ปริมาณไนโตรเจนในดินลดลงใน 4 การทดลอง ตามระยะการเจริญของพืช ดังตาราง 45 ข้อมูลปริมาณไนโตรเจนในดิน: ไม่ปลูกข้าว (ภาคผนวก ค) และภาพ 50 ข้อมูลปริมาณไนโตรเจนในดิน : ไม่ปลูกข้าวโดยปริมาณไนโตรเจนในดิน ทั้ง 3 ระยะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.00 mg/kg – 5.00 mg/kg พบว่าโมเดลที่ไม่ปลูกพืช ในระยะ Vegetative Phase การทดลอง CHEM มีปริมาณไนโตรเจนในดินมากที่สุด เท่ากับ 4.22 ± 0.01 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC500 MIC300 และ P-T มีค่าเท่ากับ 3.95 ± 0.00 3.87 ± 0.01 และ 3.80 ± 0.01 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Reproductive Phase การทดลอง CHEM มีปริมาณไนโตรเจนในดินมากที่สุด เท่ากับ 4.52 ± 0.02 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 3.85 ± 0.01 และ P-T มีค่าเท่ากับ 3.74 ± 0.01 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Ripening Phase เป็นระยะที่มีปริมาณไนโตรเจนในดินเหลืออยู่ในดิน น้อยที่สุด พบว่าการทดลอง CHEM มีปริมาณไนโตรเจนในดินมากที่สุด เท่ากับ 4.50 ± 0.01 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC500 MIC300 และ P-T มีค่าเท่ากับ 3.82 ± 0.01 3.81 ± 0.01 และ 3.67 ± 0.01 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

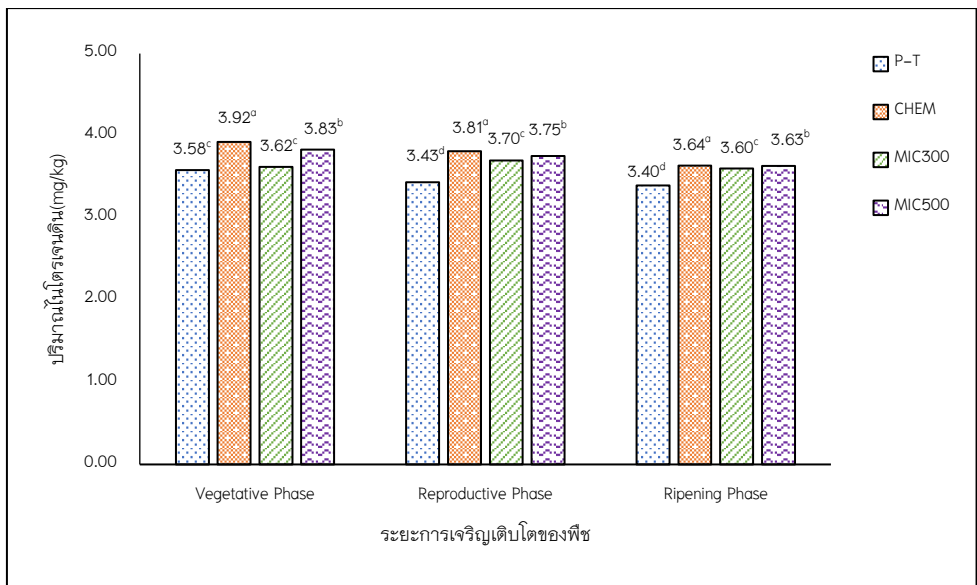


ภาพ 50 ข้อมูลปริมาณไนโตรเจนในดิน : ไม้ปลูกข้าว

จากตาราง 46 ข้อมูลปริมาณไนโตรเจนในดิน: ปลูกข้าว (ภาคผนวก ค) และ ภาพ 51 ข้อมูลปริมาณไนโตรเจนในดิน : ปลูกข้าว ระยะ Vegetative Phase พบว่า CHEM มีค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนในดิน มากที่สุด เท่ากับ 3.92 ± 0.04 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC500 MIC300 และ P-T มีค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนในดิน เท่ากับ 3.83 ± 0.01 3.62 ± 0.01 และ 3.58 ± 0.01 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Reproductive Phase พบว่า CHEM มีค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนในดิน มากที่สุด เท่ากับ 3.81 ± 0.01 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC500 MIC300 และ P-T มีค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนในดิน เท่ากับ 3.75 ± 0.01 3.70 ± 0.01 และ 3.43 ± 0.01 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Ripening Phase พบว่า CHEM มีค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนในดิน มากที่สุด เท่ากับ 3.64 ± 0.01 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC500 MIC300 และ P-T มีค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนในดิน เท่ากับ 3.63 ± 0.00 3.60 ± 0.01 และ 3.40 ± 0.01 mg/kg ตามลำดับ ซึ่ง มีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพ 51 ข้อมูลปริมาณไนโตรเจนในดิน : ปลุกข้าว

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนในดิน จากการทดลองในโมเดลที่ปลุกข้าว และไม่ปลุกข้าว นั้น พบว่า โมเดลที่ปลุกข้าว และไม่ปลุกข้าว มีแนวโน้มปริมาณไนโตรเจนในดินไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 4 การทดลอง และลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการปลุกข้าว ทั้งนี้โมเดลที่มีการปลุกข้าวมีปริมาณไนโตรเจนในดิน ลดลงมากกว่าเนื่องจากมีการใช้ไปของพืช ซึ่งในระยะ Vegetative Phase ระหว่างโมเดลที่ปลุกข้าวลดลงมากกว่าโมเดลไม่ปลุกข้าว ในการทดลอง MIC500 คิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0.97 เท่า รองลงมาได้แก่ MIC300 และ P-T มีค่าเท่ากับ 0.94 เท่า และ CHEM เท่ากับ 0.93 เท่า

ระยะ Reproductive Phase ในการทดลอง MIC500 คิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0.97 เท่า รองลงมาได้แก่ MIC300 P-T และ CHEM มีค่าเท่ากับ 0.96 0.92 และ 0.84 เท่า ตามลำดับ

ระยะ Ripening Phase ในการทดลอง MIC500 คิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0.95 เท่า รองลงมาได้แก่ MIC300 P-T และ CHEM เท่ากับ 0.94 0.93 และ 0.81 เท่า ตามลำดับ

2.4 ข้อมูลปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์

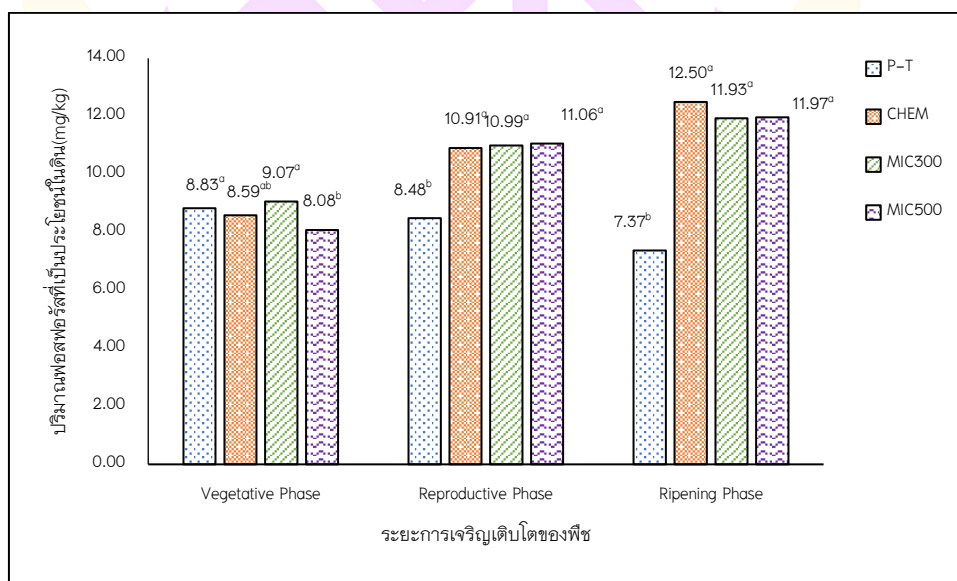
ผู้วิจัยได้ศึกษาปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ของโมเดลที่ปลุกพืช และไม่ปลุกพืช พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและลดลงอย่างต่อเนื่องจากระยะ Vegetative Phase Reproductive Phase และลดลงมากที่สุดในระยะ

Ripening Phase โดยปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ทั้ง 3 ระยะการเจริญเติบโตมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.00 mg/kg – 12.00 mg/kg มีรายละเอียดดังนี้

การทดลองที่ไม่ปลูกพืชนั้น ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ลดลงใน 4 การทดลองตามระยะการเจริญของพืช ดังตาราง 47 ข้อมูล ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์: ไม่ปลูกข้าว (ภาคผนวก ค) และภาพ 52 ข้อมูลปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์: ไม่ปลูกข้าว โดยปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ทั้ง 3 ระยะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.00 mg/kg – 13.00 mg/kg พบว่าไมเคิลที่ไม่ปลูกพืช ในระยะ Vegetative Phase การทดลอง MIC300 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ มากที่สุด เท่ากับ 9.07 ± 0.23 mg/kg รองลงมาได้แก่ CHEM P-T และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 8.59 ± 0.08 8.83 ± 0.33 และ 8.08 ± 0.09 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Reproductive Phase การทดลอง MIC500 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ มากที่สุด เท่ากับ 11.05 ± 0.07 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC300 CHEM และ P-T มีค่าเท่ากับ 10.99 ± 0.04 10.91 ± 0.03 8.48 ± 0.21 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Ripening Phase เป็นระยะที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เหลืออยู่ในดินน้อยที่สุด พบว่า การทดลอง CHEM มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ มากที่สุด เท่ากับ 12.50 ± 0.19 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC500 MIC300 และ P-T มีค่าเท่ากับ 11.96 ± 0.02 11.93 ± 0.00 และ 7.37 ± 0.44 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

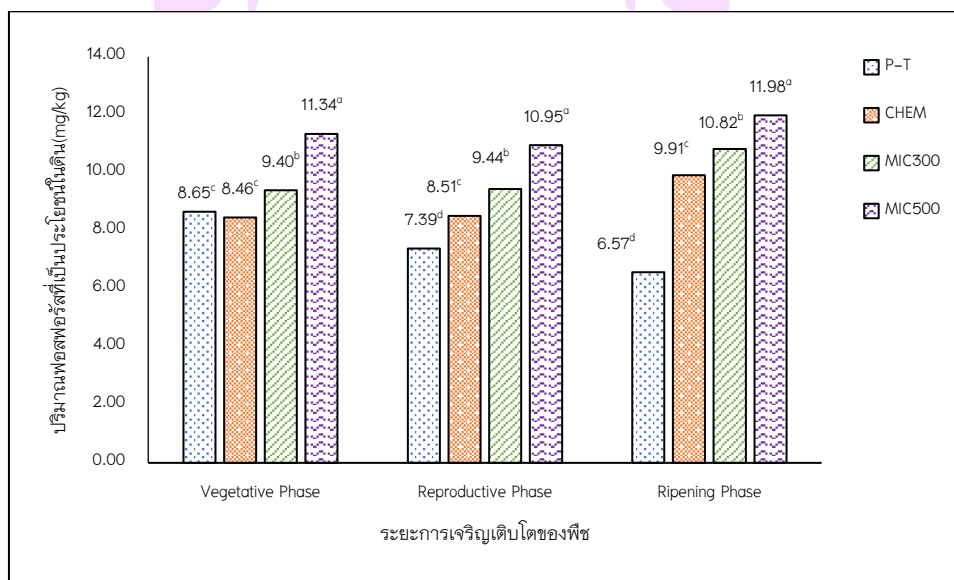


ภาพ 52 ข้อมูลปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ : ไม่ปลูกข้าว

จากตาราง 48 ข้อมูลปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์: ปลุกข้าว (ภาคผนวก ค) และภาพ 53 ข้อมูลปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์: ปลุกข้าว ระยะVegetative Phase พบว่า MIC500 มีค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มากที่สุด เท่ากับ 11.34 ± 0.00 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC300 P-T และ CHEM มีค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 9.39 ± 0.29 8.65 ± 0.23 และ 8.46 ± 0.16 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Reproductive Phase พบว่า MIC500 มีค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มากที่สุด เท่ากับ 10.95 ± 0.03 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC300 CHEM และ P-T มีค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 9.44 ± 0.28 8.52 ± 0.27 และ 7.39 ± 0.21 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Ripening Phase พบว่า MIC500 มีค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มากที่สุด เท่ากับ 11.98 ± 0.00 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC300 CHEM และ P-T มีค่าเฉลี่ยปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 10.82 ± 0.14 9.92 ± 0.04 และ 6.57 ± 0.15 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพ 53 ข้อมูลปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ : ปลุกข้าว

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ จากการทดลองในโมเดลที่ปลุกข้าวและไม่ปลุกข้าว นั้น พบว่า โมเดลที่ปลุกข้าว และไม่ปลุกข้าวมีแนวโน้มปริมาณฟอสฟอรัส

ที่เป็นประโยชน์ ไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 4 การทดลอง และลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการปลูกข้าว ทั้งนี้โมเดลที่มีการปลูกข้าวมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ลดลงมากกว่า เนื่องจากมีการใช้ไปของพืช ซึ่งในระยะ Vegetative Phase ระหว่างโมเดลที่ปลูกข้าวลดลงมากกว่าโมเดลไม่ปลูกข้าว ในการทดลอง MIC500 คิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 1.40 เท่า รองลงมาได้แก่ MIC300 เท่ากับ 1.04 เท่า CHEM และ P-T มีค่าเท่ากับ 0.98 เท่า

ระยะ Reproductive Phase ในการทดลอง MIC500 คิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 0.99 เท่า รองลงมาได้แก่ P-T MIC300 และ CHEM มีค่าเท่ากับ 0.86 0.87 และ 0.78 เท่า ตามลำดับ

ระยะ Ripening Phase ในการทดลอง MIC500 คิดเป็นสัดส่วนเท่ากับ 1.00 เท่า รองลงมาได้แก่ MIC300 P-T และ CHEM เท่ากับ 0.91 0.89 และ 0.79 เท่า ตามลำดับ

2.5 ข้อมูลปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์

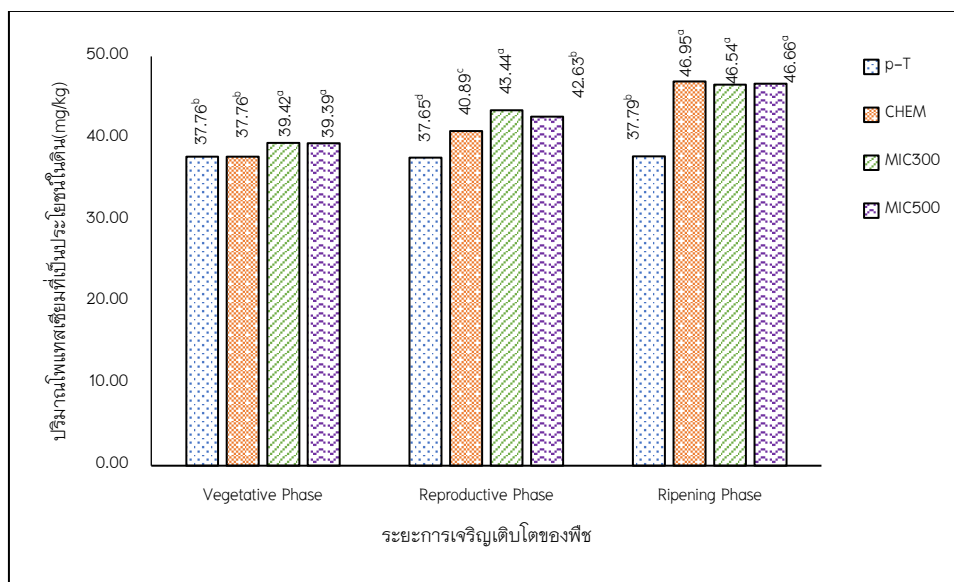
ผู้วิจัยได้ศึกษาปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ของโมเดลที่ปลูกพืช และไม่ปลูกพืช พบว่าปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและลดลงอย่างต่อเนื่องจากระยะ Vegetative Phase Reproductive Phase และลดลงมากที่สุดในระยะ Ripening Phase โดยปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ทั้ง 3 ระยะการเจริญเติบโตมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 30.00 mg/kg – 46.00 mg/kg มีรายละเอียดดังนี้

สำหรับโมเดลที่ไม่ปลูกพืชนั้น ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ยังคงลดลงใน 4 การทดลอง ตามระยะการเจริญของพืช ดังตาราง 49 ข้อมูลปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์: ไม่ปลูกข้าว (ภาคผนวก ค) และภาพ 54 ข้อมูลปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์: ไม่ปลูกข้าวโดยปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ทั้ง 3 ระยะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 37.00 mg/kg – 47.00 mg/kg พบว่าโมเดลที่ไม่ปลูกพืช ในระยะ Vegetative Phase การทดลอง MIC300 มีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์มากที่สุด เท่ากับ 39.43 ± 0.25 mg/kg รองลงมา ได้แก่ MIC500 CHEM และ P-T มีค่าเท่ากับ 39.39 ± 0.21 37.76 ± 0.13 และ 37.75 ± 0.34 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Reproductive Phase การทดลอง MIC300 มีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์มากที่สุด เท่ากับ 43.44 ± 0.16 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC500 CHEM และ P-T มีค่าเท่ากับ 42.63 ± 0.17 40.88 ± 0.28 และ 37.65 ± 0.30 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Ripening Phase เป็นระยะที่มีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์เหลืออยู่ในดินน้อยที่สุด พบว่า การทดลอง CHEM มีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์มากที่สุด เท่ากับ 46.95 ± 0.21 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC500 MIC300 และ P-T มีค่าเท่ากับ

46.66±0.19 46.54±0.19 และ 37.79±0.19 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

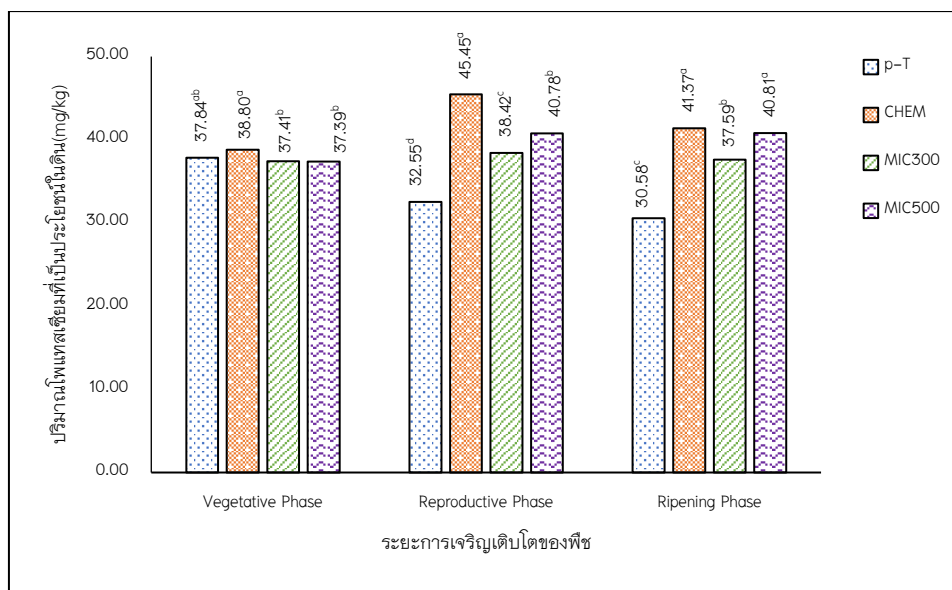


ภาพ 54 ข้อมูลปริมาณไฟแทลเซียมที่เป็นประโยชน์ : ไม่ปลูกข้าว

จากตาราง 50 ข้อมูลปริมาณไฟแทลเซียมที่เป็นประโยชน์: ปลูกข้าว (ภาคผนวก ค) และภาพ 55 ข้อมูลปริมาณไฟแทลเซียมที่เป็นประโยชน์: ปลูกข้าว ระยะ Vegetative Phase พบว่า CHEM มีค่าเฉลี่ยปริมาณไฟแทลเซียมที่เป็นประโยชน์ มากที่สุด เท่ากับ 38.80 ± 0.57 mg/kg รองลงมาได้แก่ P-T MIC300 และ MIC500 มีค่าเฉลี่ยปริมาณไฟแทลเซียมที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 37.84 ± 0.14 37.41 ± 0.13 และ 37.39 ± 0.24 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Reproductive Phase พบว่า CHEM มีค่าเฉลี่ยปริมาณไฟแทลเซียมที่เป็นประโยชน์ มากที่สุด เท่ากับ 45.45 ± 0.43 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC500 MIC300 และ P-T มีค่าเฉลี่ยปริมาณไฟแทลเซียมที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 40.78 ± 0.17 38.42 ± 0.22 และ 32.54 ± 0.21 mg/kg ตามลำดับ

ระยะ Ripening Phase พบว่า CHEM มีค่าเฉลี่ยปริมาณไฟแทลเซียมที่เป็นประโยชน์ มากที่สุด เท่ากับ 41.37 ± 0.59 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC500 MIC300 และ P-T มีค่าเฉลี่ยปริมาณไฟแทลเซียมที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 40.81 ± 0.34 37.59 ± 0.17 และ 30.58 ± 0.17 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



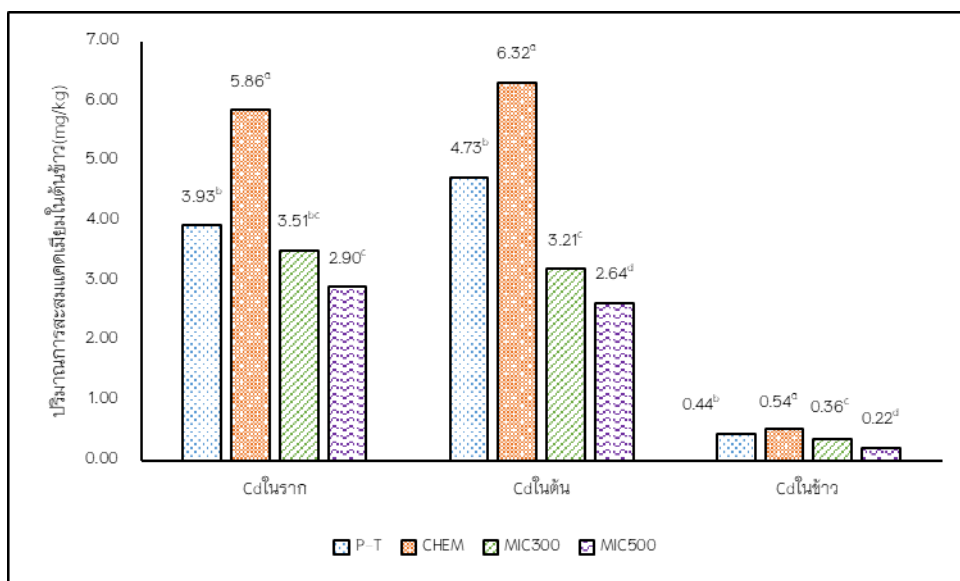
ภาพ 55 ข้อมูลปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ : ปลุกข้าว

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ จากการทดลองในโมเดลที่ปลุกข้าว และไม่ปลุกข้าว นั้น พบว่า โมเดลที่ปลุกข้าว และไม่ปลุกข้าวมีแนวโน้มปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 4 การทดลอง และลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการปลุกข้าว ทั้งนี้โมเดลที่มีการปลุกข้าวมีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ลดลงมากกว่าเนื่องจากมีการใช้ไปของพืช ซึ่งในระยะ Vegetative Phase ระหว่างโมเดลที่ปลุกข้าวลดลงมากกว่าโมเดลไม่ปลุกข้าว

2.7 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในข้าว

ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียม ในส่วนต่างของข้าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ รากข้าว ต้นข้าว และเมล็ดข้าว ในส่วนของเมล็ดข้าวแยกการศึกษาปริมาณการสะสมของแคดเมียมออกเป็น 3 ส่วน คือ เปลือกข้าว (Rice hulls) ข้าวขัดสีหรือเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออก (Polished rice) และเมล็ดที่ไม่เอาเปลือกออก (Rice in the husks) โดยผลการศึกษาดังกล่าวแสดง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

จากตาราง 51 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในรากข้าว (ภาคผนวก ค) และ ภาพ 56 ปริมาณการสะสมของแคดเมียมในข้าว พบว่าการทดลอง CHEM มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในรากข้าวมากที่สุด คือ 5.86 ± 0.14 mg/kg รองลงมาได้แก่ P-T MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 3.93 ± 0.57 3.51 ± 0.07 และ 2.90 ± 0.03 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพ 56 ปริมาณการสะสมของแคดเมียมในข้าว

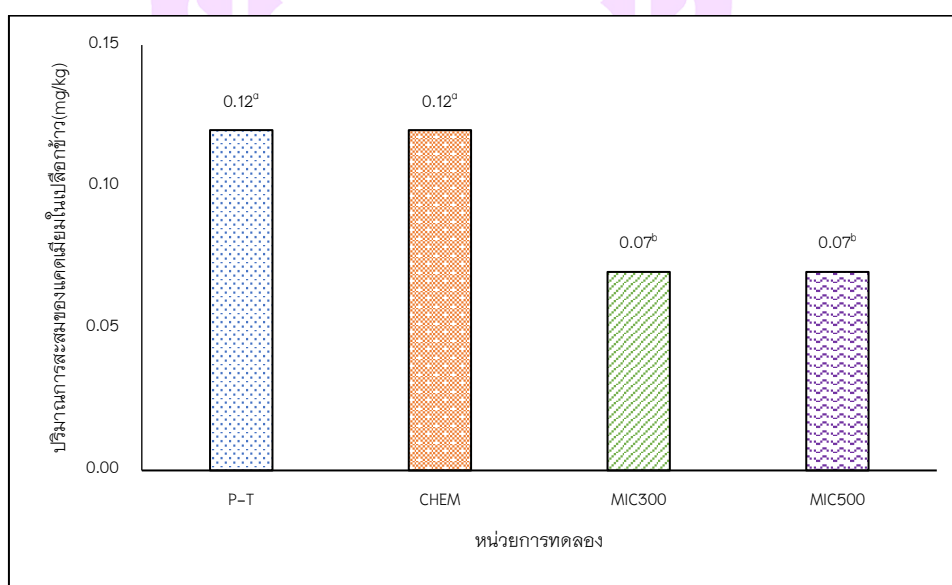
จากตาราง 52 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าว (ภาคผนวก ค) ปริมาณการสะสมของแคดเมียมในข้าว พบว่าการทดลอง CHEM มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในรากข้าวมากที่สุด คือ 6.32 ± 0.53 mg/kg รองลงมาได้แก่ P-T MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 4.73 ± 0.98 3.21 ± 0.07 และ 2.64 ± 0.06 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตาราง 53 (ภาคผนวก ค) ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว และ ภาพ 57-58 ปริมาณการสะสมของแคดเมียมในข้าว ผู้วิจัยได้ศึกษาปริมาณแคดเมียมใน 3 ส่วน เปลือกข้าว (Rice hulls) ข้าวขัดสีหรือเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออก (Polished rice) และ เมล็ดที่ไม่เอาเปลือกออก (Rice in the husks) พบว่า ในเปลือกข้าว (Rice hulls) การทดลอง CHEM P-T มีปริมาณแคดเมียม เท่ากันและมีค่ามากที่สุด คือ 0.12 ± 0.00 mg/kg ซึ่งมีความมากกว่ามาตรฐาน Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) ที่กำหนดไว้ที่ไม่เกิน 0.20 mg/kg ขณะที่ข้าวขัดสีหรือเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออก (Polished rice) มีเพียงการทดลอง MIC500 ที่มีปริมาณแคดเมียม เท่ากับอยู่ในค่ามาตรฐาน Codex ที่กำหนดไว้ที่ไม่เกิน 0.20 mg/kg นอกจากนี้พบว่าเมล็ดที่ไม่เอาเปลือกออก (Rice in the husks) มีปริมาณแคดเมียมมากกว่าเปลือกข้าว (Rice hulls) ข้าวขัดสีหรือเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออก (Polished rice) โดย มีเพียง MIC500 ที่มีปริมาณแคดเมียมลดลงมากกว่าการทดลองอื่นและมีค่าใกล้เคียงมาตรฐาน Codex มากที่สุด คือ 0.22 ± 0.01 mg/kg ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

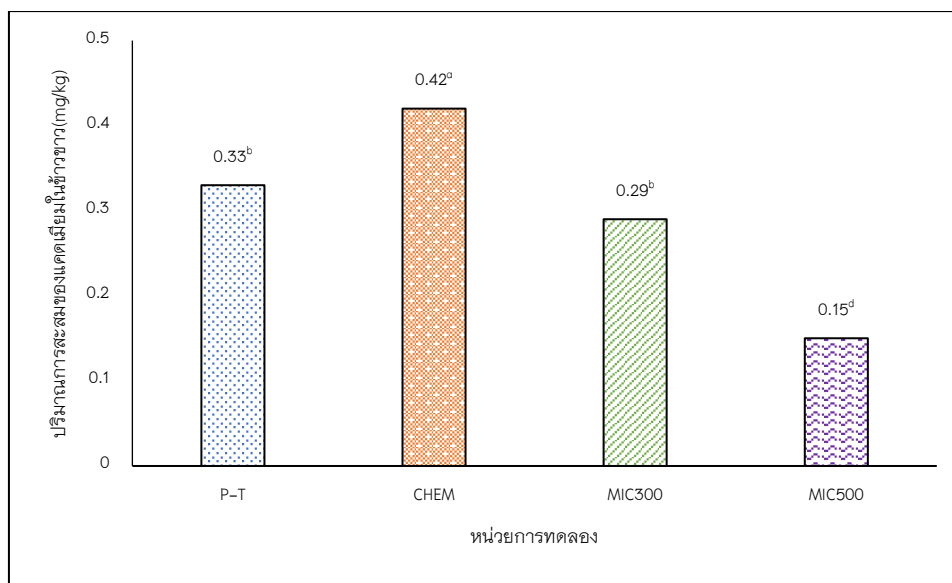
ในเปลือกข้าว (Rice hulls) พบว่า การทดลอง CHEM และ P-T มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเปลือกข้าว เท่ากันและมีค่ามากที่สุด คือ 0.12 ± 0.00 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 0.07 ± 0.00 และ 0.06 ± 0.00 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ข้าวขัดสีหรือเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออก (Polished rice) พบว่า การทดลอง CHEM มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออก มากที่สุด คือ 0.42 ± 0.03 mg/kg รองลงมาได้แก่ P-T MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 0.33 ± 0.01 0.29 ± 0.00 และ 0.15 ± 0.00 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมล็ดที่ไม่เอาเปลือกออก (Rice in the husks) พบว่า การทดลอง CHEM มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดที่ไม่เอาเปลือกออก มากที่สุด คือ 0.54 ± 0.03 mg/kg รองลงมาได้แก่ P-T MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 0.44 ± 0.01 0.36 ± 0.01 และ 0.22 ± 0.01 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพ 57 ปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเปลือกข้าว (rice hulls)



ภาพ 58 ข้าวขัดสีหรือเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออก (Polished rice)

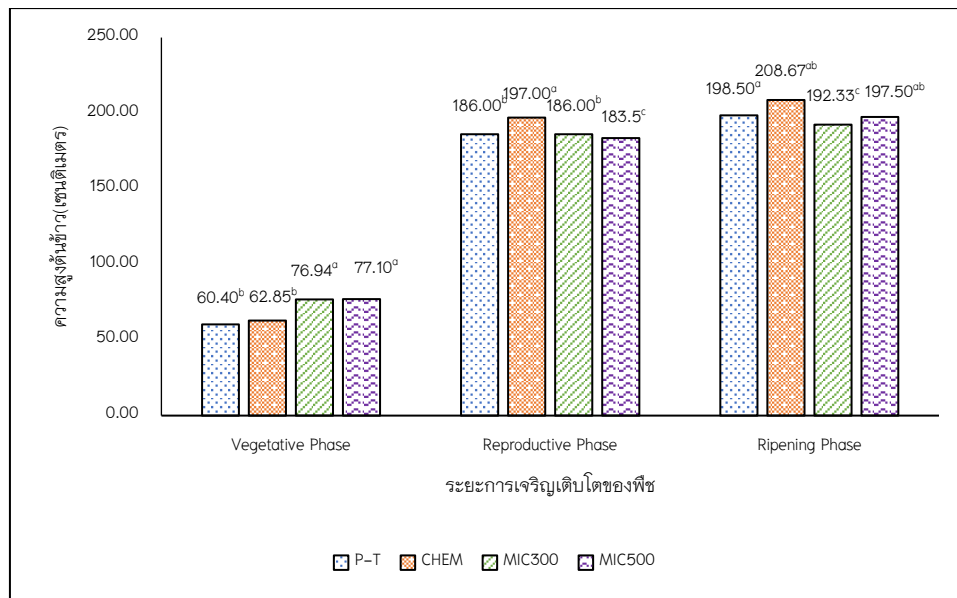
2.8 ข้อมูลการเจริญเติบโตของข้าว

ผู้วิจัยได้ศึกษาการเจริญเติบโตของข้าว ได้แก่ ความสูงของต้นข้าว จำนวนต้นน้ำหนักรากข้าว น้ำหนักต้นข้าว โดยผลการศึกษาแสดง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

จากตาราง 41 ข้อมูลความสูงของต้นข้าว (ภาคผนวก ค) และภาพ 59 ข้อมูลความสูงของต้นข้าว พบว่าในระยะ Vegetative Phase การทดลอง MIC500 มีความสูงของต้นข้าวมากที่สุด คือ 77.10 ± 2.14 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC300 CHEM และ P-T มีค่าเท่ากับ 76.94 ± 3.68 62.85 ± 4.03 และ 60.40 ± 2.60 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ระยะ Reproductive Phase การทดลอง CHEM มีความสูงของต้นข้าวมากที่สุด คือ 197.00 ± 0.00 mg/kg รองลงมาได้แก่ MIC300 และ P-T มีค่าเท่ากัน 186.00 ± 0.00 mg/kg คือ MIC500 มีค่าเท่ากับ 183.50 ± 0.50 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ระยะ Ripening Phase การทดลอง CHEM มีความสูงของต้นข้าวมากที่สุด คือ 208.67 ± 7.45 mg/kg รองลงมาได้แก่ P-T MIC500 และ MIC300 มีค่าเท่ากับ 198.50 ± 3.50 197.50 ± 0.29 และ 192.33 ± 0.33 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

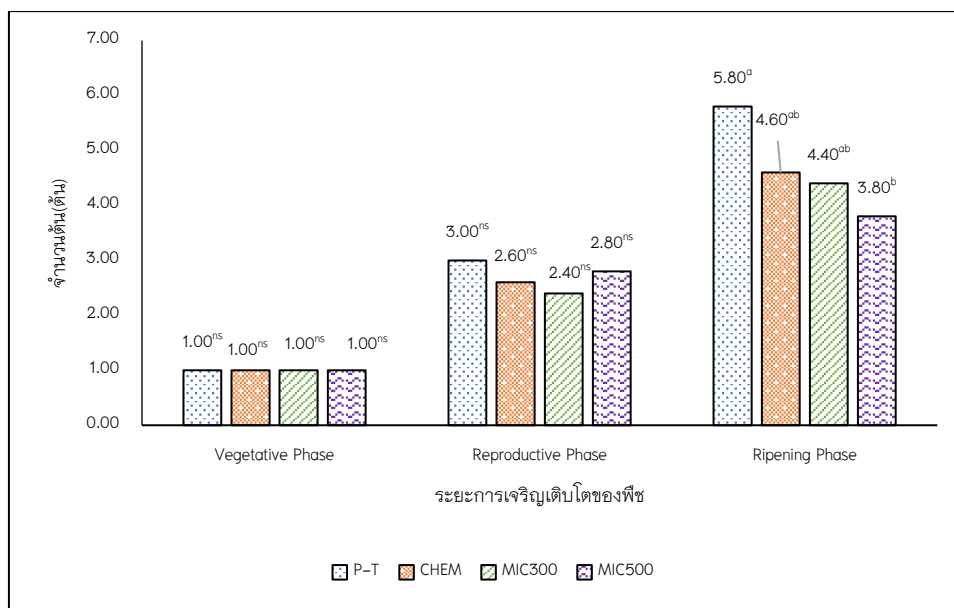


ภาพ 59 ข้อมูลความสูงของต้นข้าว

จากตาราง 55 ข้อมูลจำนวนต้น (ภาคผนวก ค) และภาพ 60 ข้อมูลจำนวนต้น พบว่าในระยะ Vegetative Phase การทดลอง P-T CHEM MIC300 และ MIC500 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.00 ± 0.00 ต้น ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ระยะ Reproductive Phase การทดลอง P-T CHEM MIC300 และ MIC500 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.00 ± 0.32 2.60 ± 0.24 2.40 ± 0.24 และ 2.80 ± 0.20 ต้น ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ระยะ Ripening Phase การทดลอง P-T มีค่าเฉลี่ยของจำนวนต้น มากที่สุดคือ 5.80 ± 0.37 ต้น รองลงมาได้แก่ CHEM MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 4.60 ± 0.51 4.40 ± 0.51 และ 3.80 ± 0.58 ต้น ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

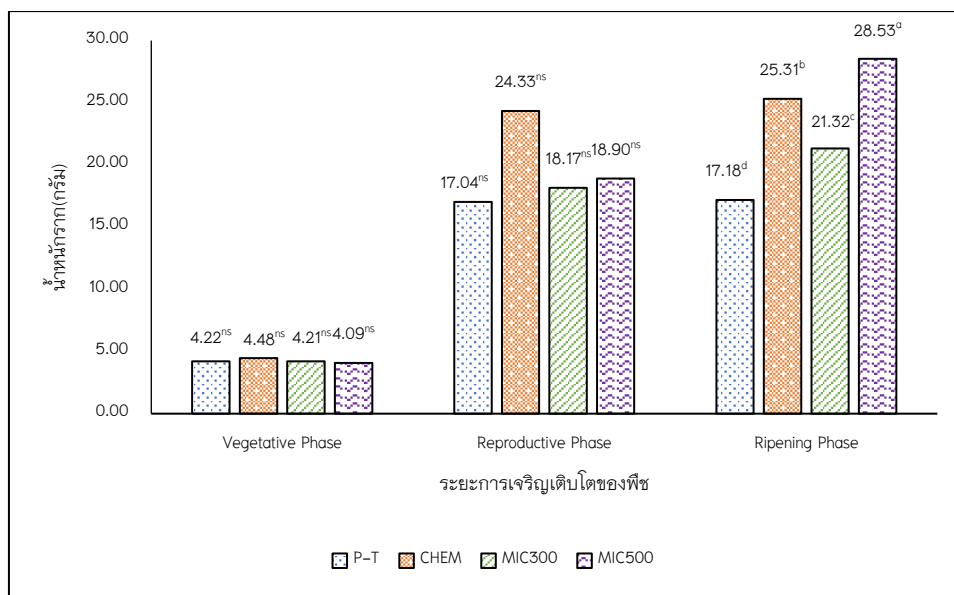


ภาพ 60 ข้อมูลจำนวนต้น

จากตาราง 56 ข้อมูลน้ำหนักรากข้าว (ภาคผนวก ค) และภาพ 61 ข้อมูลน้ำหนักรากข้าวพบว่าในระยะ Vegetative Phase การทดลอง P-T CHEM MIC300 และ MIC500 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.22 ± 0.57 4.48 ± 0.92 4.21 ± 0.15 และ 4.09 ± 0.07 g. ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ระยะ Reproductive Phase การทดลอง P-T CHEM MIC300 และ MIC500 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 17.04 ± 0.32 24.33 ± 1.71 18.17 ± 0.15 และ 18.90 ± 0.28 g. ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ระยะ Ripening Phase การทดลอง MIC500 มีค่าเฉลี่ยของน้ำหนักรากข้าวมากที่สุด คือ 28.54 ± 0.19 g. รองลงมาได้แก่ CHEM MIC300 และ P-T มีค่าเท่ากับ 25.31 ± 1.27 21.32 ± 0.96 และ 17.18 ± 0.28 g. ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

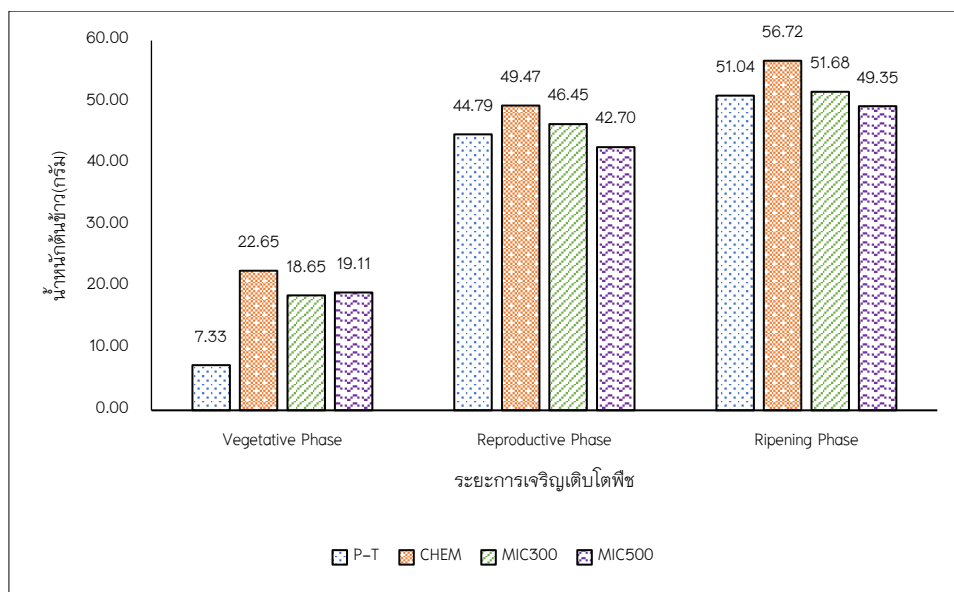


ภาพ 61 ข้อมูลน้ำหนักน้ำรากข้าว

จากตาราง 57 ข้อมูลน้ำหนักต้นข้าว (ภาคผนวก ค) และภาพ 62 ข้อมูลน้ำหนักต้นข้าวพบว่าในระยะ Vegetative Phase การทดลอง P-T CHEM MIC300 และ MIC500 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20.15 ± 1.89 22.65 ± 2.99 18.65 ± 0.44 และ 19.11 ± 0.06 g. ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ระยะ Reproductive Phase การทดลอง CHEM มีค่าเฉลี่ยของข้อมูลน้ำหนักต้นข้าวมากที่สุด คือ $49.47 \pm 0.00a$ g. รองลงมาได้แก่ MIC300 P-T และ MIC500 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 46.45 ± 0.00 44.80 ± 0.95 42.70 ± 0.00 g. ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ระยะ Ripening Phase การทดลอง CHEM มีค่าเฉลี่ยของข้อมูลน้ำหนักต้นข้าวมากที่สุด คือ 56.72 ± 2.44 g. รองลงมาได้แก่ MIC300 P-T และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 51.67 ± 0.62 51.04 ± 3.50 และ 49.35 ± 0.18 g. ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

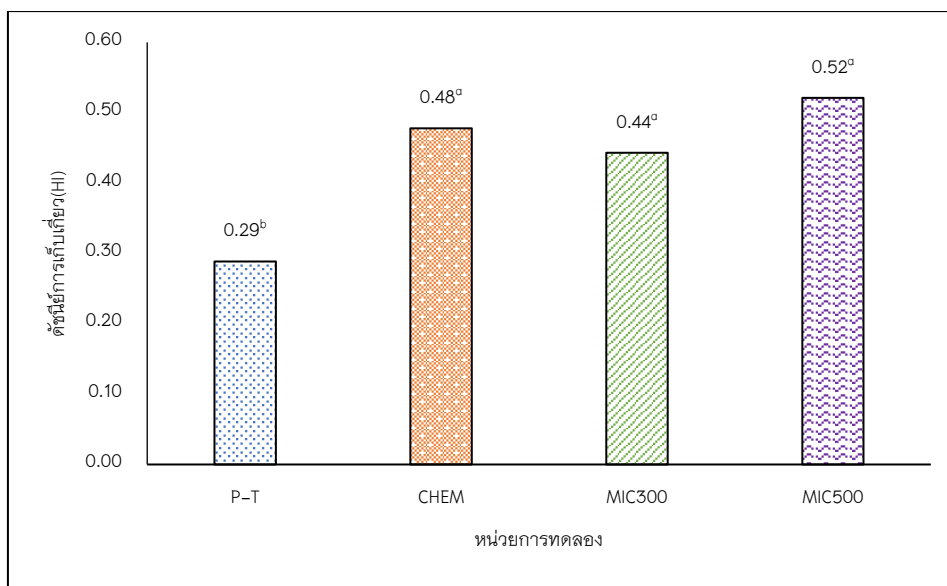


ภาพ 62 ข้อมูลน้ำหนักต้นข้าว

2.9 ข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest index: HI) และผลผลิตของข้าว

ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest Index: HI) และผลผลิตของข้าว ได้แก่ น้ำหนักของเมล็ดข้าว จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ โดยผลการศึกษาแสดง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

จากตาราง 58 ข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest Index: HI) (ภาคผนวก ค) และภาพ 63 ข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest Index: HI) พบว่า การทดลอง MIC500 มีค่าเฉลี่ยดัชนีการเก็บเกี่ยวมากที่สุด คือ 0.52 ± 0.03 รองลงมาได้แก่ CHEM MIC300 และ P-T มีค่าเท่ากับ 0.48 ± 0.05 0.44 ± 0.03 และ 0.29 ± 0.03 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

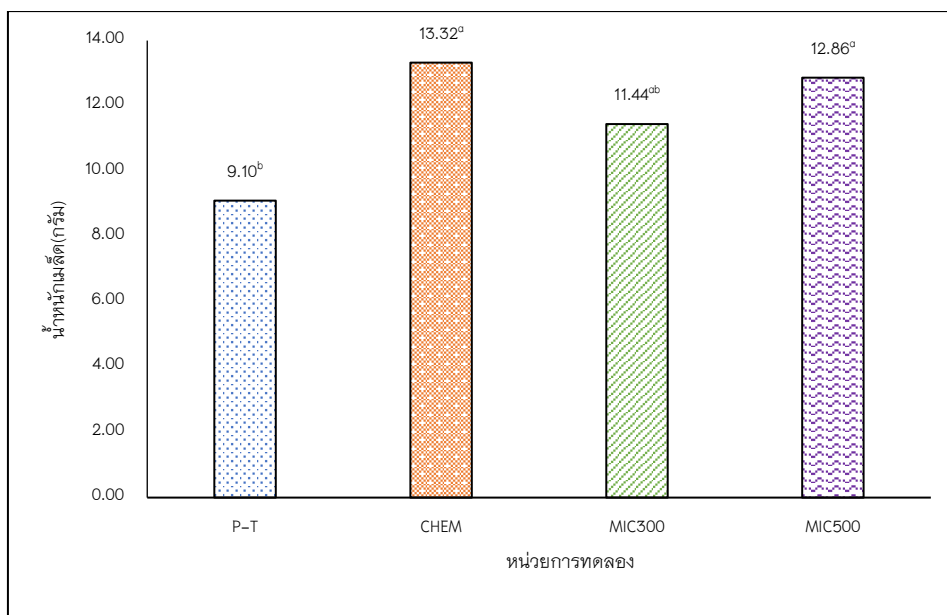


ภาพ 63 ข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest index: HI)

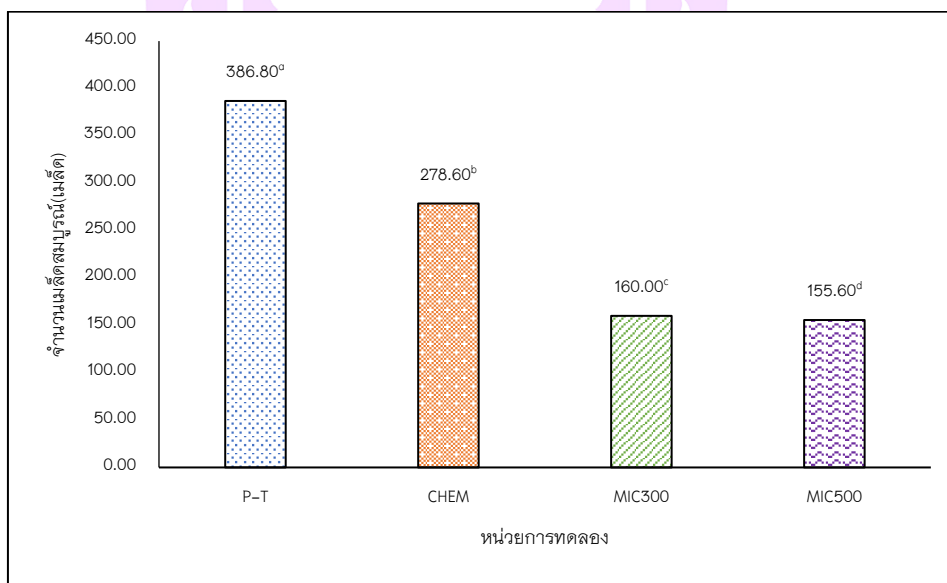
จากตาราง 59 ข้อมูลข้อมูลผลผลิตของข้าว (ภาคผนวก ค) และภาพ 64 น้ำหนักของเมล็ดข้าว ภาพ 65 จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ ภาพ 66 จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ มีการเก็บข้อมูลใน 3 ส่วน ได้แก่ พบว่า จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ และน้ำหนักของเมล็ดข้าว พบว่า ด้านจำนวนเมล็ดสมบูรณ์ การทดลอง P-T มีค่าเฉลี่ยจำนวนเมล็ดสมบูรณ์ มากที่สุด คือ 386.80 ± 43.72 เมล็ด รองลงมาได้แก่ CHEM MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 278.60 ± 25.45 160.00 ± 23.18 และ 155.60 ± 13.03 เมล็ดตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ด้านจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ การทดลอง P-T มีค่าเฉลี่ยจำนวนเมล็ดสมบูรณ์ มากที่สุด คือ 35.25 ± 0.48 เมล็ด รองลงมาได้แก่ CHEM MIC300 และ MIC500 มีค่าเท่ากับ 19.33 ± 4.91 14.00 ± 1.08 และ 15.00 ± 1.14 เมล็ดตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

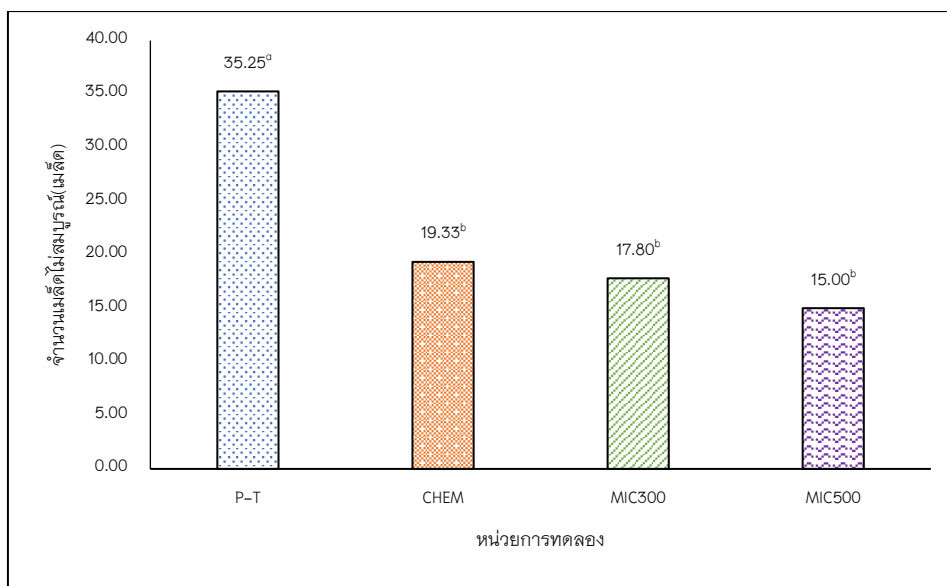
ด้านน้ำหนักของเมล็ดข้าว การทดลอง CHEM มีค่าเฉลี่ยจำนวนเมล็ดสมบูรณ์ มากที่สุด คือ 13.32 ± 0.92 g. รองลงมาได้แก่ MIC500 MIC300 และ P-T มีค่าเท่ากับ 12.86 ± 0.84 11.44 ± 0.88 และ 9.10 ± 1.14 g. ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ภาพ 64 น้ำหนักของเมล็ดข้าว



ภาพ 65 จำนวนเมล็ดสมบูรณ์



ภาพ 66 จำนวนเมล็ดไม่สะสม

2.10 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียม (Cd) สู่เมล็ดข้าว (Bioaccumulation factor: BAF)

ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียม (Cd) สู่เมล็ดข้าว (Bioaccumulation factor: BAF) โดยผลการศึกษาแสดง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

จากตาราง 25 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียม (Cd) สู่เมล็ดข้าว (Bioaccumulation factor: BAF) เมื่อพิจารณาการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว bioaccumulation factor (BAF) แต่ละหน่วยการทดลอง ซึ่งค่า BAF จะบอกถึงความสามารถของข้าวในการเคลื่อนย้ายแคดเมียมเข้ามาสะสม ในเมล็ดข้าวได้มากน้อยขนาดไหนโดยข้าวที่มีสะสมแคดเมียมได้มากจะต้องมีค่า BAF มากกว่า 1 สามารถคำนวณได้จาก (Prattana, Yotsawate and Nimnara, 2019)

$$\text{BAF} = \frac{\text{Cd concentration in grain}}{\text{Cd concentration in soil}} \quad (2)$$

พบว่าเมล็ดข้าวที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยเคมี CHEM มีการสะสมของแคดเมียมมากที่สุด โดยมีค่า BAF เท่ากับ $6.55\text{E}-03 \pm 0.00$ รองลงมาได้แก่ P-T, MIC300 และ MIC500 มีค่า $6.15\text{E}-03 \pm 0.00$, $5.37\text{E}-03 \pm 0.00$ และ $3.35\text{E}-03 \pm 0.00$ ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ผลจากการทดลองค่า BAF น้อยกว่า 1 หมายความว่า ข้าวที่ปลูกมีการเคลื่อนย้ายแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินมาสะสมในเมล็ดข้าวต่ำกว่า 1 สอดคล้องกับ สายชล และธนวรรณ (2013) ได้ศึกษาการสะสมและการกระจายของแคดเมียมและตะกั่วในข้าวสาลีที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อน พบว่าข้าวสาลีที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียมและตะกั่วมีค่า BCF น้อยกว่า 1

ตาราง 25 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียม (Cd) สะสมในข้าว (Bioaccumulation Factor: BAF)

No.	Treatment	BAF		
		\bar{x}	C.V	S.D.
1	P-T	6.15E-03±0.00 ^a	0.12	0.00
2	CHEM	6.55E-03±0.00 ^a	0.13	0.00
3	MIC300	5.37E-03±0.00 ^b	0.06	0.00
4	MIC500	3.35E-03±0.00 ^c	0.09	0.00

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan's multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %
 ** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

2.11 ข้อมูลความสามารถในการเคลื่อนย้ายของแคดเมียม (Translocation Factor: TF)

ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลความสามารถในการเคลื่อนย้ายของแคดเมียม (Translocation Factor: TF) โดยผลการศึกษาแสดง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

จากตาราง 26 ข้อมูลความสามารถในการเคลื่อนย้ายของแคดเมียม (Translocation Factor: TF) เมื่อพิจารณาความสามารถในการเคลื่อนย้ายของแคดเมียม (Translocation Factor: TF) แต่ละหน่วยการทดลอง ซึ่งค่า TF เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถของพืชในการลำเลียงแคดเมียมจากรากสู่ ใบ และ เมล็ดข้าว ซึ่งพืชที่มีค่า TF > 1 หมายความว่า พืชสามารถเคลื่อนย้ายโลหะหนักจากรากไปสะสมยังส่วนต่าง ๆ ที่อยู่เหนือพื้นดินได้ดี ซึ่งความสามารถในการเคลื่อนย้ายของแคดเมียม Soil-Roots และRoots-Shoots การทดลอง CHEM มีมากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 6.70E-02±0.00และ1.09E+00 ±0.06 ตามลำดับ ซึ่งการทดลอง CHEM ใน Roots-Shoots มีค่ามากกว่า 1 หมายความว่าข้าวในการทดลองนี้สามารถเคลื่อนย้ายของแคดเมียมไปสะสมในต้นได้ดี ขณะที่ MIC500 มีค่าความสามารถในการเคลื่อนย้ายของแคดเมียม น้อยที่สุดในSoil-roots, Roots Shoots และ Shoots-Grains โดยมีค่าเท่ากับ 4.48E-02±0.00 9.09E-01±0.00 และ 8.23E-02±0.00ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตาราง 26 ข้อมูลความสามารถในการเคลื่อนย้ายของแคดเมียม (Translocation Factor: TF)

No.	Treatment	Soil-Roots				Translocation Factor (TF)				Shoots-Grains			
		\bar{x}	CV	S.D.	C.V	\bar{x}	S.D.	C.V	S.D.	\bar{x}	S.D.	C.V	S.D.
1	P-T	5.88E-02±0.01 ^{ab}	0.39	0.02	0.00	9.09E-01±0.00 ^b	0.00	0.00	0.00	1.33E-01±0.02 ^a	0.27	0.04	0.04
2	CHEM	6.70E-02±0.00 ^a	0.06	0.00	0.12	1.09E+00±0.06 ^a	0.13	0.13	0.13	8.11E-02±0.00 ^b	0.04	0.00	0.00
3	MIC300	5.54E-02±0.00 ^{ab}	0.13	0.01	0.09	9.60E-01±0.05 ^b	0.09	0.09	0.09	9.94E-02±0.01 ^{ab}	0.23	0.02	0.02
4	MIC500	4.48E-02±0.00 ^b	0.09	0.00	0.00	9.09E-01±0.00 ^b	0.00	0.00	0.00	8.23E-02±0.00 ^b	0.04	0.00	0.00

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์

1. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์การทดลองสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

ปริมาณแคดเมียมในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมในราก ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว จำนวนต้น และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.95 0.59 0.75 และ 0.64 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในราก ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว จำนวนต้น และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.95 0.59 0.75 และ 0.64 หน่วย ตามลำดับ ปริมาณแคดเมียมในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมในต้น ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.56 และ 0.54 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในต้น และปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น 0.56 และ 0.54 หน่วย ตามลำดับ และปริมาณแคดเมียมในดินมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักราก น้ำหนักต้นข้าว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.61 และ 0.72 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักราก น้ำหนักต้นข้าวลดลง 0.61 และ 0.72 หน่วย ตามลำดับ

ปริมาณแคดเมียมในรากมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมในต้น ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าวจำนวนต้นและจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.61 0.60 0.63 0.72 และ 0.69 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในต้น ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว จำนวนต้นและจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.61 0.60 0.63 0.72 และ 0.69 หน่วย ตามลำดับ และปริมาณแคดเมียมในรากมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักรากข้าวและน้ำหนักต้นข้าว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.66 และ 0.68 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในรากเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ น้ำหนักรากข้าวและน้ำหนักต้นข้าวลดลง 0.66 และ 0.68 ตามลำดับ

ปริมาณแคดเมียมในต้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว ดัชนีการเก็บเกี่ยว น้ำหนักเมล็ดข้าวและจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.93 0.90 0.60 0.64 0.69 และ 0.92 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในต้น

เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว ดัชนีการเก็บเกี่ยว น้ำหนักเมล็ดข้าว และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.93 0.90 0.60 0.64 0.69 และ 0.92 หน่วย ตามลำดับ ปริมาณแคดเมียมในต้นความสัมพันธ์กับจำนวนเมล็ดสมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.49 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในต้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนเมล็ดสมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.49 หน่วย ปริมาณแคดเมียมในต้นมีความสัมพันธ์กับความสูงต้น และน้ำหนักรากที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.63 และ 0.89 หมายความว่า หากปริมาณแคดเมียมในต้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสูงต้น และน้ำหนักรากลดลง 0.63 และ 0.89 ตามลำดับ และปริมาณแคดเมียมในต้นมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักต้น ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.46 หมายความว่า หากปริมาณแคดเมียมในต้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักต้นลดลง 0.46 หน่วย

ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว จำนวนต้น ดัชนีการเก็บเกี่ยว น้ำหนักเมล็ดข้าว และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.96 0.59 0.58 0.68 และ 0.95 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว จำนวนต้น ดัชนีการเก็บเกี่ยว น้ำหนักเมล็ดข้าว และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.96 0.59 0.58 0.68 และ 0.95 หน่วย ตามลำดับ และปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวมีความสัมพันธ์กับความสูงต้นข้าว และน้ำหนักรากข้าว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.62 และ 0.95 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสูงต้นข้าว และน้ำหนักรากข้าวลดลง 0.62 และ 0.95 หน่วย ตามลำดับ

ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าวมีความสัมพันธ์กับจำนวนต้น น้ำหนักเมล็ดและจำนวนเมล็ดลีบ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.57 0.61 และ 0.90 หมายความว่า หากปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนต้น น้ำหนักเมล็ด และจำนวนเมล็ดลีบเพิ่มขึ้น 0.57 0.61 และ 0.90 หน่วย ตามลำดับ ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าวมีความสัมพันธ์กับดัชนีการเก็บเกี่ยว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.47 หมายความว่า หากปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ดัชนีการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น 0.47 หน่วย และปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าวมีความสัมพันธ์กับความสูงต้นข้าว

และน้ำหนักรากข้าว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.54 และ 0.88 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสูงต้นข้าว และน้ำหนักรากข้าวลดลง 0.54 และ 0.88 หน่วย ตามลำดับ

ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวมีความสัมพันธ์กับจำนวนต้น ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.46 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนต้นลดลง 0.46 หน่วย ตามลำดับ

ความสูงต้นข้าวมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักราก ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.69 หมายความว่าหากความสูงต้นข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักรากเพิ่มขึ้น 0.69 หน่วย และความสูงต้นข้าวมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักเมล็ดข้าว จำนวนเมล็ดสมบูรณ์และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.59 0.53 และ 0.63 หมายความว่าหากความสูงต้นข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักเมล็ดข้าว จำนวนเมล็ดสมบูรณ์และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ลดลง 0.59 0.53 และ 0.63 หน่วย ตามลำดับ

จำนวนต้นข้าวมีความสัมพันธ์กับดัชนีการเก็บเกี่ยว และจำนวนเมล็ดสีบ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.57 และ 0.67 หมายความว่าหากจำนวนต้นข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ดัชนีการเก็บเกี่ยว และจำนวนเมล็ดสีบเพิ่มขึ้น 0.57 และ 0.67 หน่วย ตามลำดับ และจำนวนต้นข้าวมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักรากข้าว และน้ำหนักต้นข้าว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.70 และ 0.59 หมายความว่าหากจำนวนต้นข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักรากข้าว และน้ำหนักต้นข้าวลดลง 0.70 และ 0.59 หน่วย ตามลำดับ

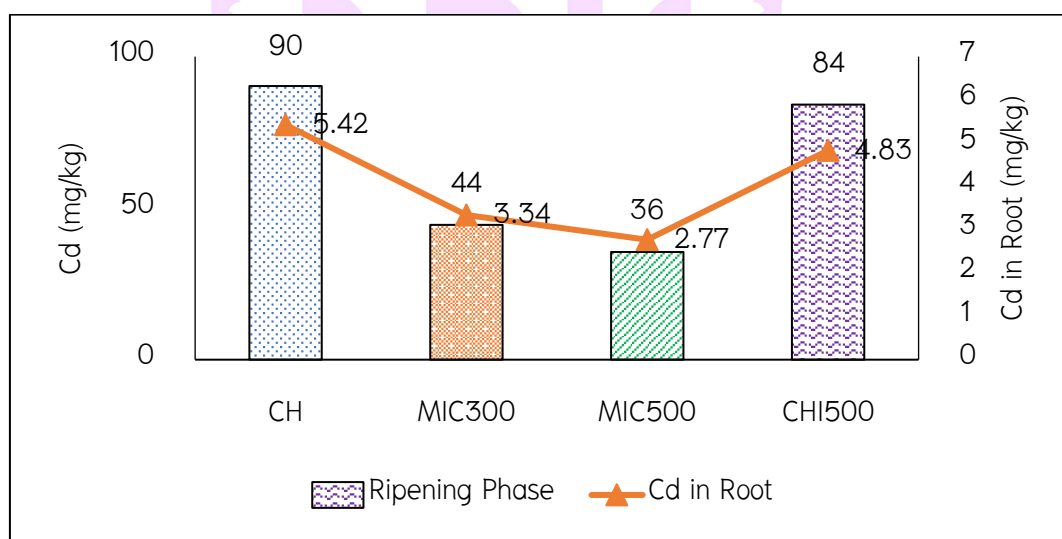
น้ำหนักรากข้าวมีความสัมพันธ์กับดัชนีการเก็บเกี่ยว น้ำหนักเมล็ดข้าว จำนวนเมล็ดสมบูรณ์และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.62 0.68 0.45 และ 0.95 หมายความว่าหากน้ำหนักรากข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ดัชนีการเก็บเกี่ยว น้ำหนักเมล็ดข้าว จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ลดลง 0.62 0.68 0.45 และ 0.95 หน่วย ตามลำดับ

น้ำหนักต้นข้าวมีความสัมพันธ์กับดัชนีการเก็บเกี่ยว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.54 หมายความว่าหากน้ำหนักต้นข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ดัชนีการเก็บเกี่ยวลดลง 0.54 หน่วย

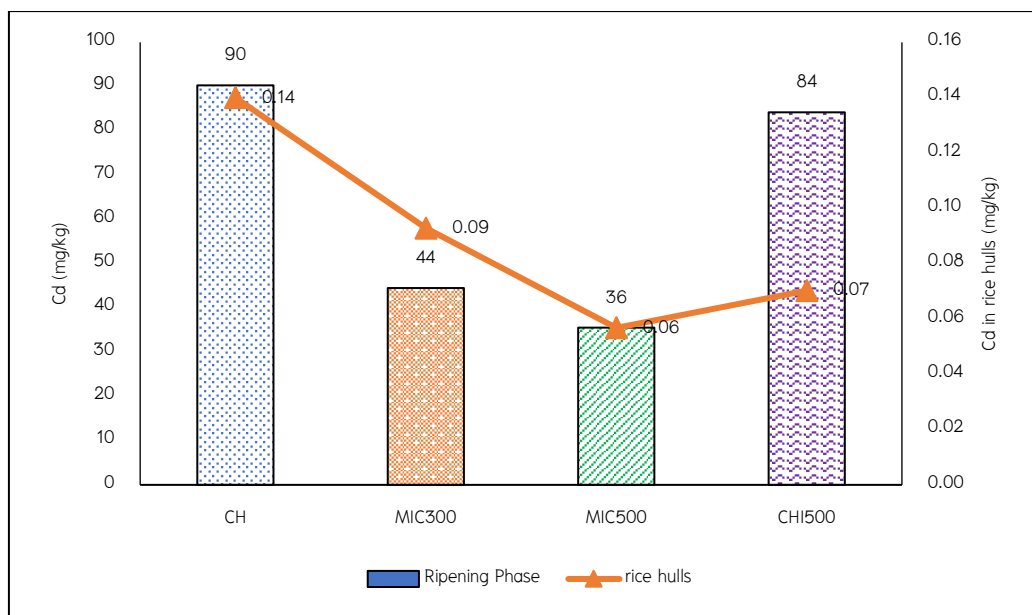
ดัชนีการเก็บเกี่ยวมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักเมล็ดข้าว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.47 หมายความว่าหากน้ำหนักต้นข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น 0.47 หน่วย และดัชนีการเก็บเกี่ยวมีความสัมพันธ์กับจำนวนเมล็ดสมบูรณ์และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.61 และ 0.67 หมายความว่าหากน้ำหนักต้นข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนเมล็ดสมบูรณ์และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.61 และ 0.67 หน่วย ตามลำดับ

น้ำหนักเมล็ดข้าวมีความสัมพันธ์กับจำนวนเมล็ดสมบูรณ์และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.80 และ 0.75 หมายความว่าหากน้ำหนักเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนเมล็ดสมบูรณ์และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.80 และ 0.75 หน่วย ตามลำดับ

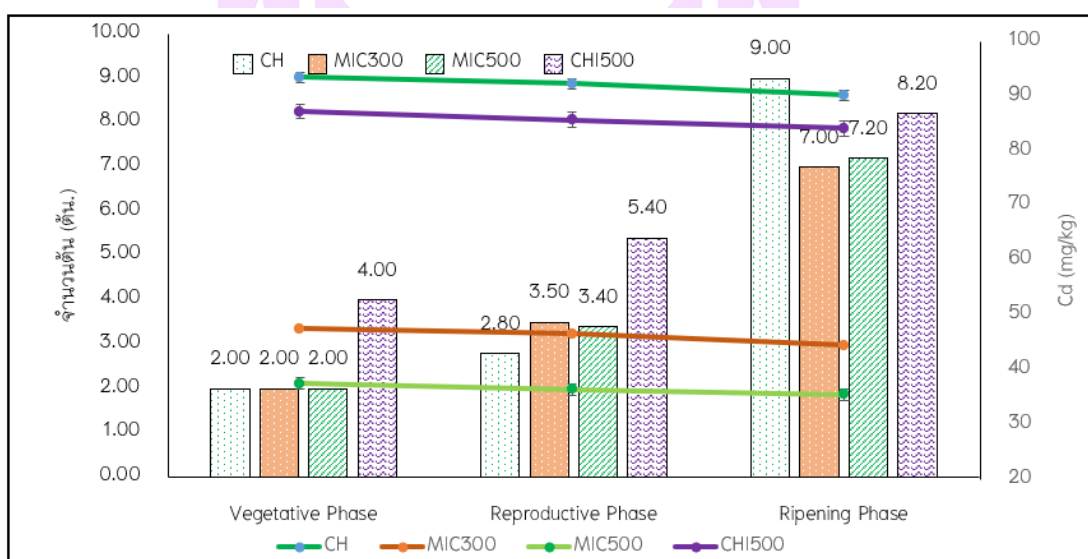
จำนวนเมล็ดสมบูรณ์มีความสัมพันธ์กับจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.57 หมายความว่าหากจำนวนเมล็ดสมบูรณ์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.57 หน่วย ตามลำดับ



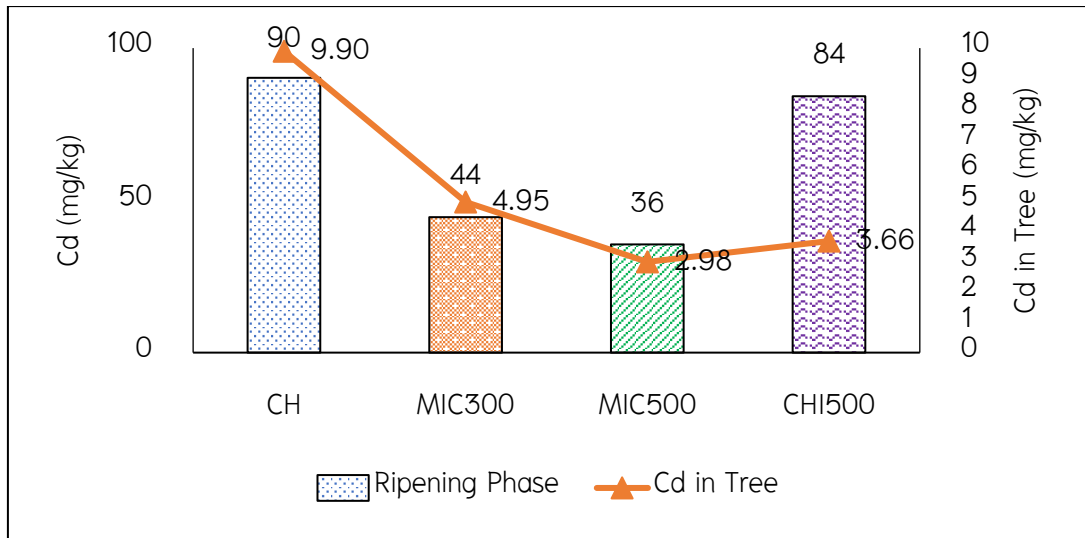
ภาพ 67 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินและปริมาณแคดเมียมในราก



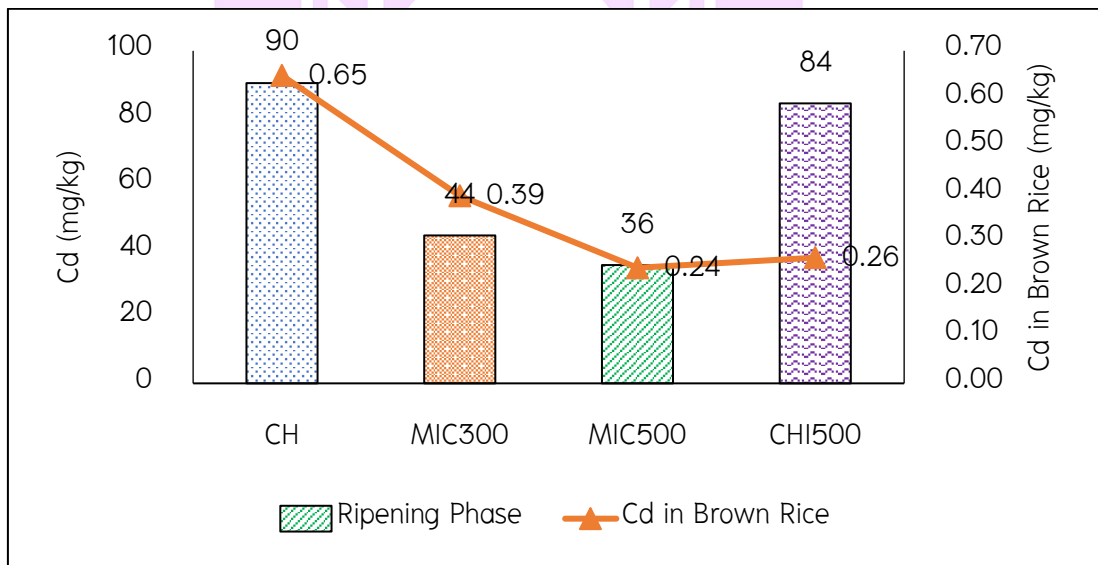
ภาพ 68 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินและปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว



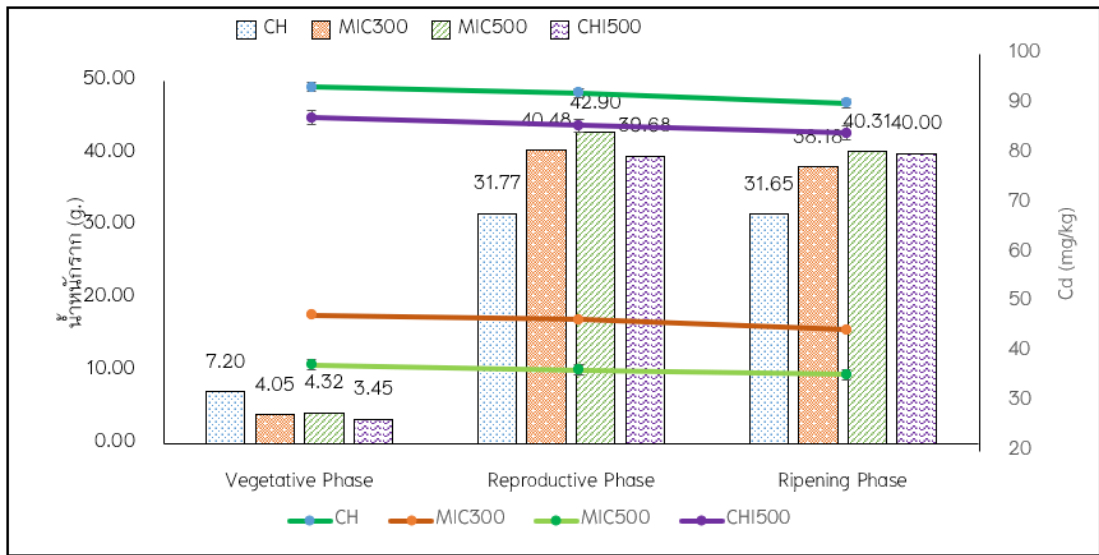
ภาพ 69 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินและจำนวนต้นข้าว



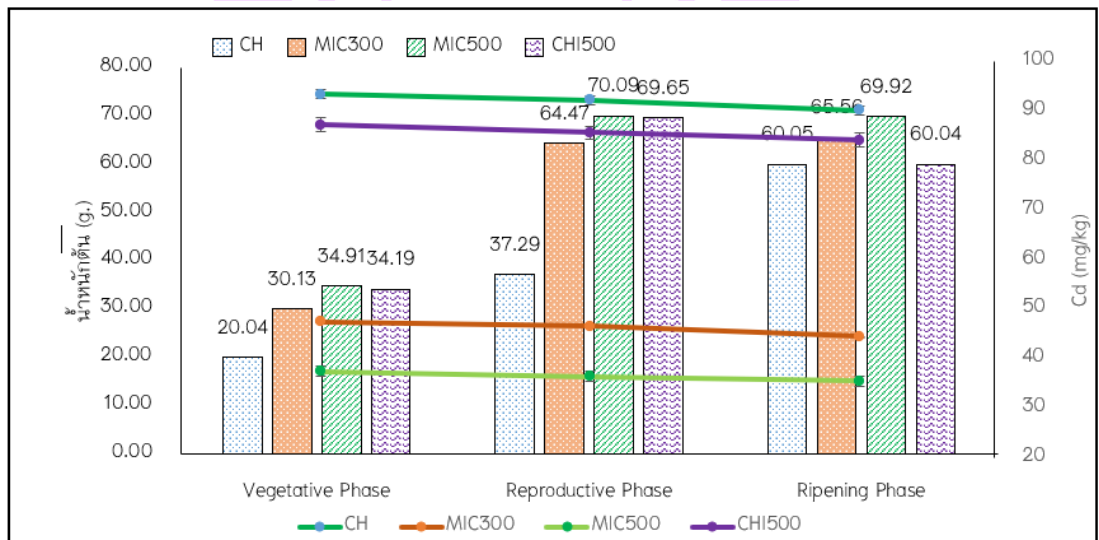
ภาพ 70 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินและปริมาณแคดเมียมในต้น



ภาพ 71 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินและปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว



ภาพ 72 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินและน้ำหนักราก



ภาพ 73 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินและน้ำหนักต้น

2. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์การหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ตา

ปริมาณแคดเมียมในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมในราก ปริมาณแคดเมียมในต้น ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวขาว ความสูงต้นข้าว และจำนวนเมล็ดสมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.83 0.95 0.88 0.89 0.83 0.71 0.62 และ 0.70 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในราก ปริมาณแคดเมียมในต้น ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวขาว ความสูงต้นข้าว และจำนวนเมล็ดสมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.83 0.95 0.88 0.89 0.83 0.71 0.62 และ 0.70 หน่วย ตามลำดับ และปริมาณแคดเมียมในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน และปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.52 และ 0.51 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน และปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินลดลง 0.52 และ 0.51 หน่วย ตามลำดับ

ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณไนโตรเจนในดิน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ดัชนีการเก็บเกี่ยว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.69 0.78 และ 0.69 หมายความว่าหากปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนในดิน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ดัชนีการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น 0.69 0.78 และ 0.69 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน น้ำหนักต้นข้าว น้ำหนักเมล็ด ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.56 0.55 และ 0.55 หมายความว่าหากปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน น้ำหนักต้นข้าว น้ำหนักเมล็ดเพิ่มขึ้น 0.56 0.55 และ 0.55 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมในต้นข้าว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.45 หมายความว่าหากปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในต้นข้าว ลดลง 0.45 หน่วย และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.80 และ 0.76

หมายความว่าหากปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ลดลง 0.80 และ 0.76 หน่วย ตามลำดับ

ปริมาณไนโตรเจนในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน น้ำหนักรากข้าว ดัชนีการเก็บเกี่ยวน้ำหนักเมล็ดข้าว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.91 0.95 0.82 0.96 และ 0.95 หมายความว่าหากปริมาณไนโตรเจนในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน น้ำหนักรากข้าว ดัชนีการเก็บเกี่ยวน้ำหนักเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น 0.91 0.95 0.82 0.96 และ 0.95 หน่วย ตามลำดับ ปริมาณไนโตรเจนในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว จำนวนตัน ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.52 และ 0.49 หมายความว่าหากปริมาณไนโตรเจนในดินเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว จำนวนตันลดลง 0.52 และ 0.49 ตามลำดับ ปริมาณไนโตรเจนในดินมีความสัมพันธ์กับจำนวนเมล็ดสมบูรณ์และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.80 และ 0.96 หมายความว่าหากปริมาณไนโตรเจนในดินเพิ่มขึ้นส่งผลให้จำนวนเมล็ดสมบูรณ์และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ลดลง 0.80 และ 0.96 ตามลำดับ

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน น้ำหนักรากข้าว ดัชนีการเก็บเกี่ยว และน้ำหนักเมล็ดข้าว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.85 0.83 0.94 และ 0.82 หมายความว่าหากปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน น้ำหนักรากข้าว ดัชนีการเก็บเกี่ยว และน้ำหนักเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น 0.85 0.83 0.94 และ 0.82 หน่วย ตามลำดับ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวขาว จำนวนตัน จำนวนเมล็ดสมบูรณ์และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.57 0.76 0.49 0.58 0.95 และ 0.98 หมายความว่าหากปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวขาว จำนวนตัน จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ลดลง 0.57 0.76 0.49 0.58 0.95 และ 0.98 หน่วย ตามลำดับ

ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักรากข้าว ดัชนีการเก็บเกี่ยว น้ำหนักเมล็ดข้าว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.85 0.96 และ 0.98 หมายความว่าหากปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักรากข้าว ดัชนีการเก็บเกี่ยว น้ำหนักเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น 0.85 0.96 และ 0.98 หน่วย ตามลำดับ ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินมีความสัมพันธ์กับ จำนวนต้น จำนวนเมล็ดสมบูรณ์และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.58 0.69 และ 0.92 หมายความว่าหากปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินมีความสัมพันธ์กับ จำนวนต้น จำนวนเมล็ดสมบูรณ์และจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ลดลง 0.58 0.69 และ 0.92 หน่วย ตามลำดับ

ปริมาณแคดเมียมในรากข้าวมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมในต้นข้าว ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวขาว ความสูงต้นข้าว และน้ำหนักต้นข้าว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.76 0.79 0.65 0.79 0.59 และ 0.73 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในรากข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในต้นข้าว ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวขาว ความสูงต้นข้าว และน้ำหนักต้นข้าวเพิ่มขึ้น 0.76 0.79 0.65 0.79 0.59 และ 0.73 หน่วย ตามลำดับ

ปริมาณแคดเมียมในต้นข้าวมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวขาว ความสูงต้นข้าว จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.90 0.83 0.86 0.63 และ 0.62 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวขาว ความสูงต้นข้าว จำนวนเมล็ดสมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.90 0.83 0.86 0.63 และ 0.62 หน่วย ตามลำดับ

ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวขาว น้ำหนักต้น และจำนวนเมล็ดสมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.82 0.99 0.48 และ 0.65 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวขาว น้ำหนักต้น และจำนวนเมล็ดสมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.82 0.99 0.48 และ 0.65 หน่วย ตามลำดับ ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวมีความสัมพันธ์กับ

น้ำหนักรากข้าว สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.45 หมายความว่าปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักรากข้าวลดลง 0.45 หน่วย ตามลำดับ

ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าวมีความสัมพันธ์กับปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ความสูงต้นข้าว จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ และจำนวนไม่เมล็ดสมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.73 0.55 0.89 และ 0.68 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว ความสูงต้นข้าว จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ และจำนวนไม่เมล็ดสมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.73 0.55 0.89 และ 0.68 หน่วย ตามลำดับ ปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าวมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักรากข้าว และดัชนีการเก็บเกี่ยว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.48 และ 0.55 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักรากข้าว และดัชนีการเก็บเกี่ยวลดลง 0.48 และ 0.55 หน่วย ตามลำดับ

ปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักต้น ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.47 หมายความว่าหากปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักต้นเพิ่มขึ้น 0.47 หน่วย ตามลำดับ และปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวมีความสัมพันธ์กับจำนวนเมล็ดสมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.56 หมายความว่า หากปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนเมล็ดสมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.56 หน่วย ตามลำดับ

ความสูงต้นข้าวมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักต้น ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.66 หมายความว่าหากความสูงต้นข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักต้นเพิ่มขึ้น 0.66 หน่วย

จำนวนต้นมีความสัมพันธ์กับจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.57 หมายความว่า หากจำนวนต้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.57 หน่วย จำนวนต้นมีความสัมพันธ์กับจำนวนเมล็ดสมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.55 หมายความว่า หากจำนวนต้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนเมล็ดสมบูรณ์จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.55 หน่วย จำนวนต้นมีความสัมพันธ์กับดัชนีการเก็บเกี่ยว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศ

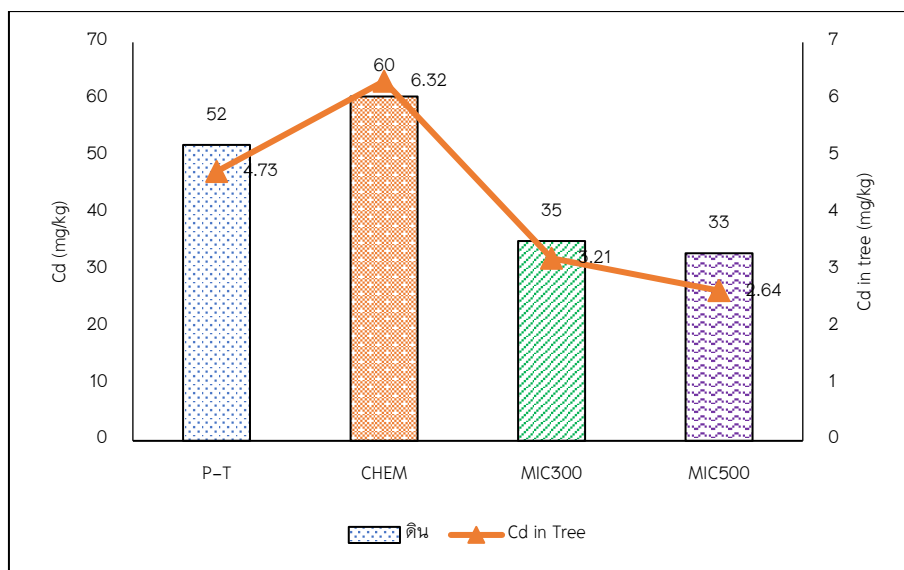
ทางตรงข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.58 หมายความว่า หากจำนวนต้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ดัชนีการเก็บเกี่ยวลดลง 0.58 หน่วย จำนวนต้นมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักรากข้าวและน้ำหนักเมล็ดข้าวที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.45 และ 0.49 หมายความว่าหากจำนวนต้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักรากข้าวและน้ำหนักเมล็ดข้าวลดลง 0.45 และ 0.49 หน่วย ตามลำดับ

น้ำหนักรากข้าวมีความสัมพันธ์กับดัชนีการเก็บเกี่ยว และน้ำหนักเมล็ดข้าวที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.91 และ 0.86 หมายความว่าหากน้ำหนักรากข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ดัชนีการเก็บเกี่ยวและน้ำหนักเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น 0.91 และ 0.86 หน่วย ตามลำดับ และน้ำหนักรากข้าวมีความสัมพันธ์กับจำนวนเมล็ดสมบูรณ์จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.67 และ 0.82 หมายความว่าหากน้ำหนักรากข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนเมล็ดสมบูรณ์จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ลดลง 0.67 และ 0.82 หน่วย ตามลำดับ

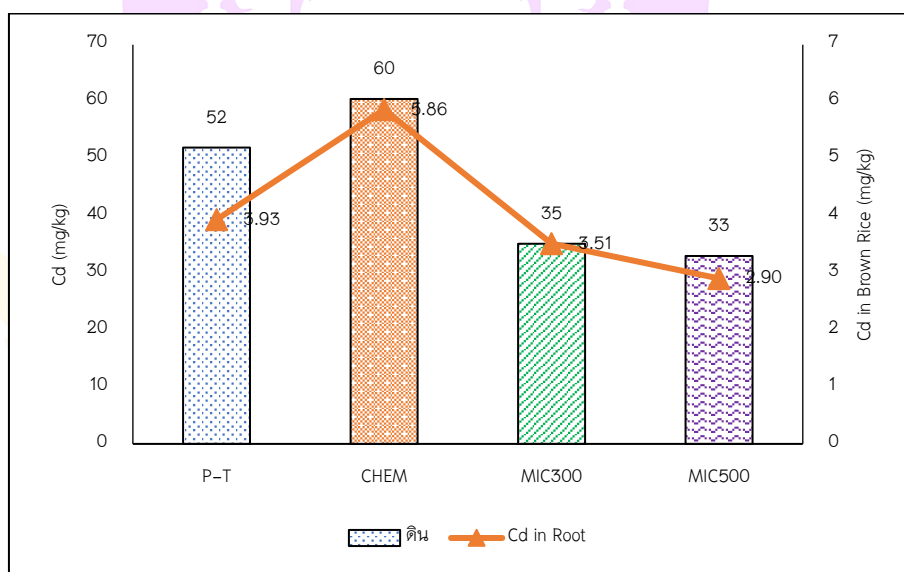
ดัชนีการเก็บเกี่ยวมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักเมล็ดข้าว ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.96 หมายความว่าหากดัชนีการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำหนักเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น 0.96 หน่วย ดัชนีการเก็บเกี่ยวมีความสัมพันธ์กับจำนวนเมล็ดสมบูรณ์จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.82 และ 0.97 หมายความว่าหากดัชนีการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ลดลง 0.82 และ 0.97 หน่วย ตามลำดับ

น้ำหนักเมล็ดข้าวมีความสัมพันธ์กับจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้าม ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.88 หมายความว่าหากน้ำหนักเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ลดลง 0.88 หน่วย

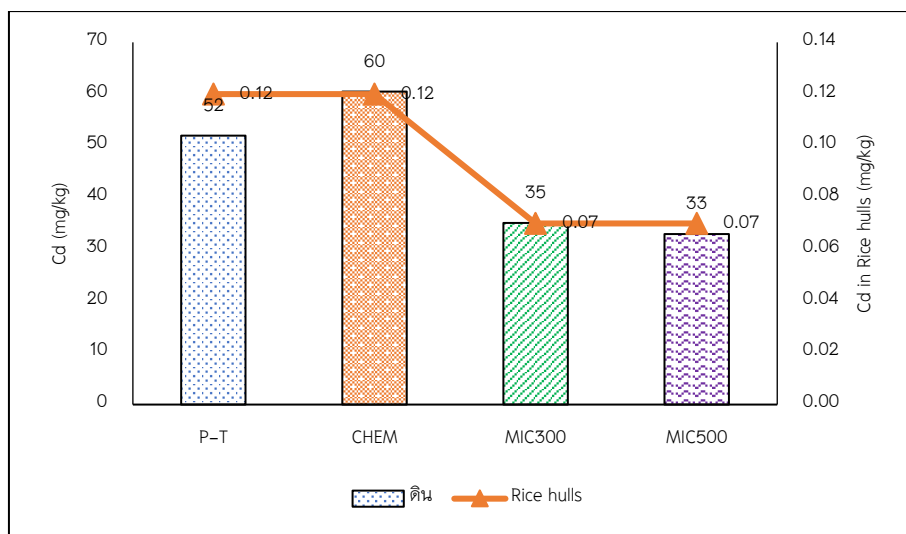
จำนวนเมล็ดสมบูรณ์มีความสัมพันธ์กับจำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ขนาดความสัมพันธ์เท่ากับ 0.92 หมายความว่าหากจำนวนเมล็ดสมบูรณ์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนเมล็ดไม่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น 0.92 หน่วย



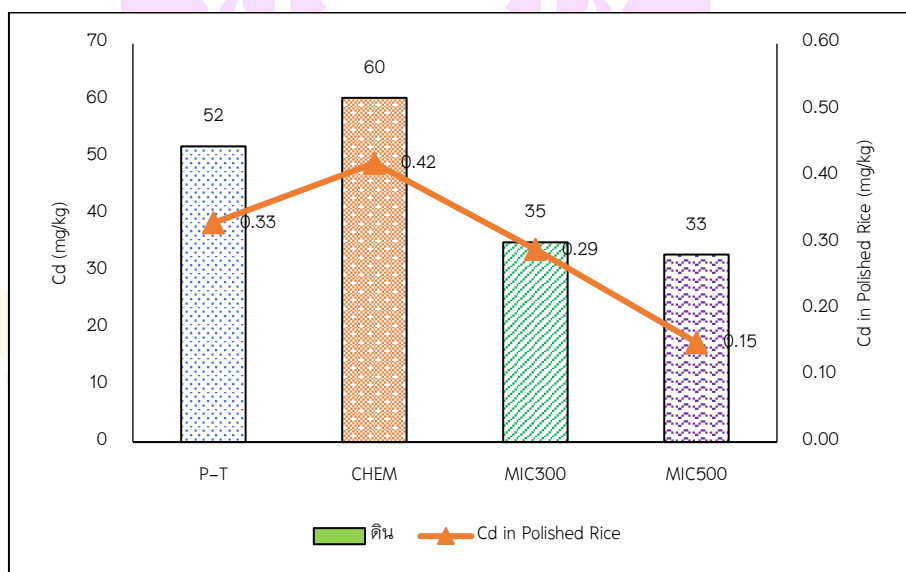
ภาพ 74 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินกับปริมาณแคดเมียมในต้นข้าว



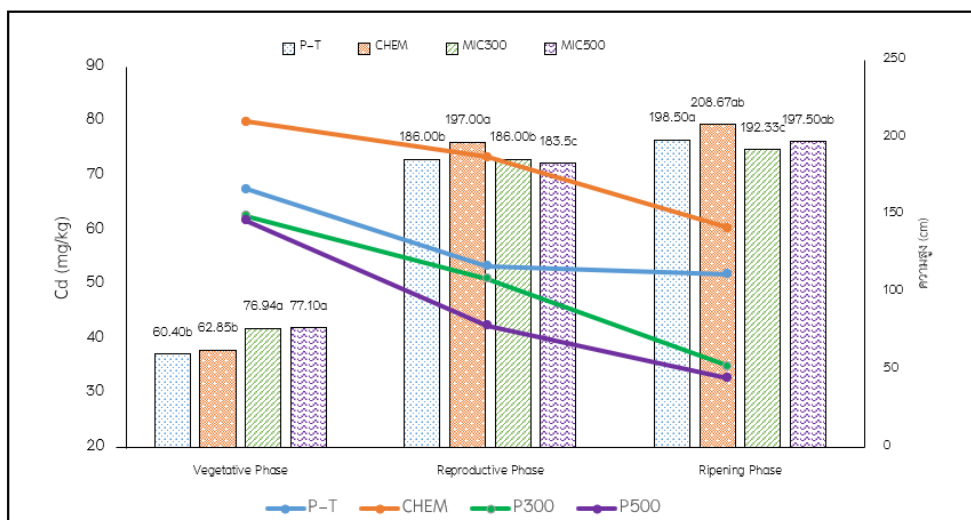
ภาพ 75 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินกับปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าว



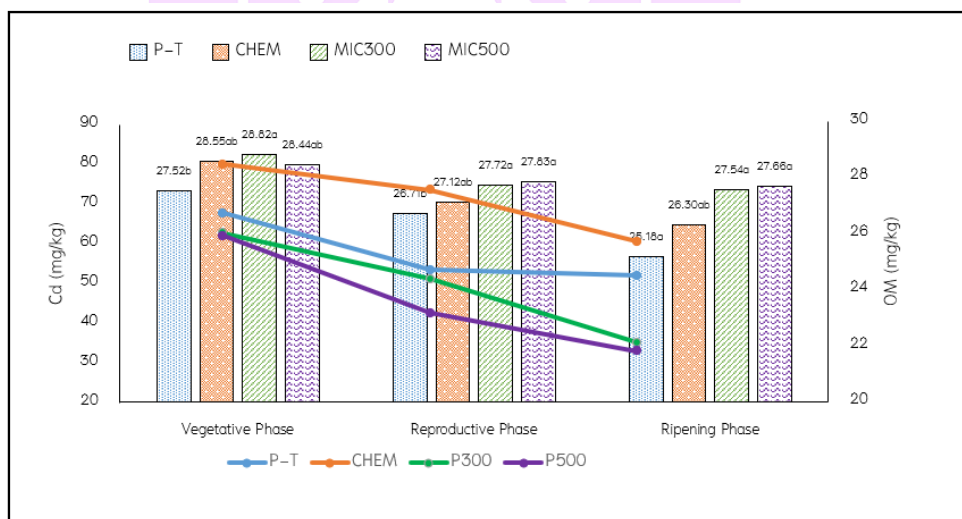
ภาพ 76 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินกับปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าว



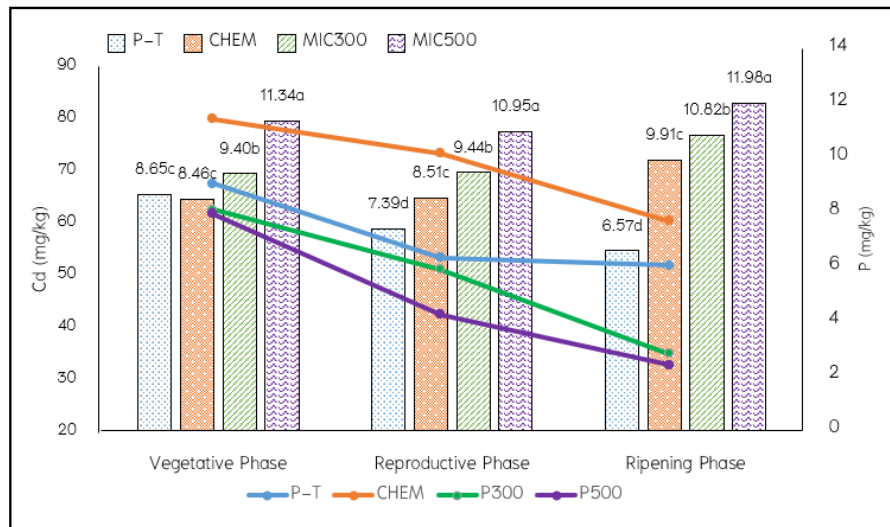
ภาพ 77 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินกับปริมาณแคดเมียมในข้าวขาว



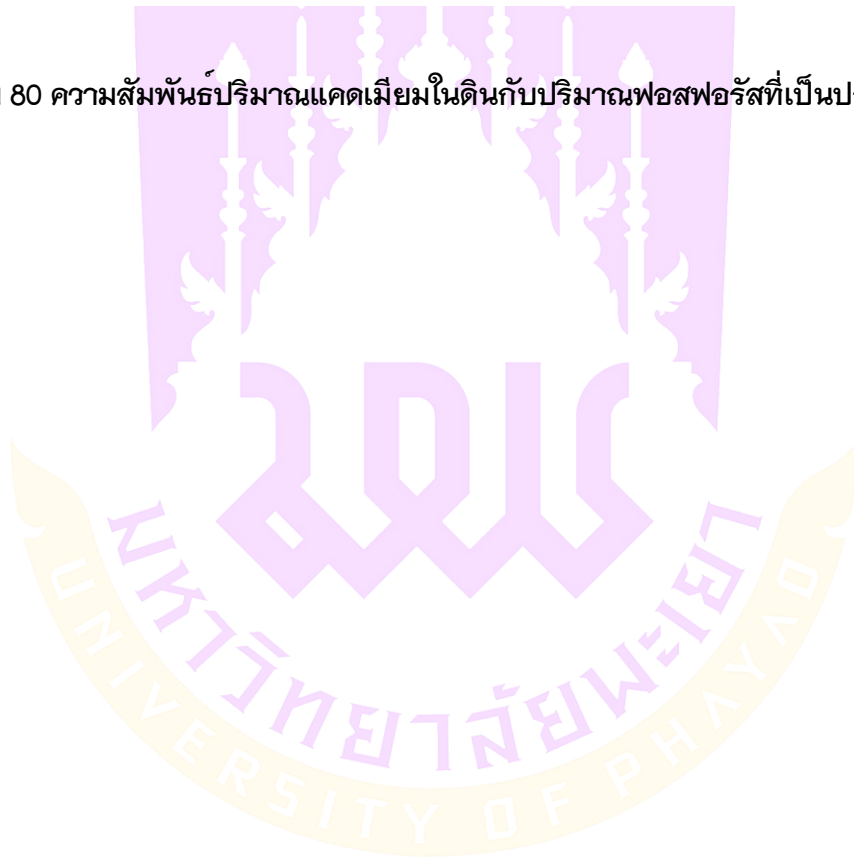
ภาพ 78 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินกับความสูงต้นข้าว



ภาพ 79 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินกับปริมาณอินทรียวัตถุในดิน



ภาพ 80 ความสัมพันธ์ปริมาณแคดเมียมในดินกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน



บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

การประยุกต์ใช้สารชีวภัณฑ์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดินและลดการปนเปื้อนของแคดเมียมในนาข้าว โดยสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. การทดสอบความทนของจุลินทรีย์ในสารชีวภัณฑ์ต่อความเข้มข้นของแคดเมียมพบว่าจากการจำแนกชนิดแบคทีเรียโดยวิธี 16s rDNA พบว่ามีแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ *Bacillus safensis* subsp. *safensis* และ *Bacillus safensis* subsp. *Osmophilus* ที่ทนต่อแคดเมียมและสามารถเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่ผสมสารละลายแคดเมียม 1,000 mg/L ได้ โดยมีปริมาณเท่ากับ 6.21×10^3 CFU/ml คิดเป็นร้อยละ 10.58 เมื่อเทียบกับ Control การศึกษาความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย (Minimal Inhibitory Concentration; MIC) เท่ากับ 1,200 mg/L และความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่แบคทีเรียในสารชีวภัณฑ์ไม่สามารถเจริญได้ (Minimum bactericidal concentration :MBC) เท่ากับ 1,400 mg/L

2. การทดลองสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ ทั้งในกระถางที่ไม่ปลูกพืชและกระถางปลูกพืชพบว่าใน 2 สภาวะหน่วยการทดลอง CH มีปริมาณแคดเมียมในดินมากที่สุด รองลงมาคือ CHI500, MIC300 และ MIC500 ตามลำดับ โดยกระถางที่ไม่ปลูกข้าวนั้นมีปริมาณแคดเมียมในดินมากกว่ากระถางที่ปลูกข้าวพบว่าในกระถางที่ไม่ปลูกข้าวหน่วยการทดลอง MIC500 (36.45 mg/kg) มีปริมาณแคดเมียมในดินลดลงจากแคดเมียมเริ่มต้น (104.2 mg/kg) คิดเป็นร้อยละ 65.02 รองลงมาได้แก่ MIC300 (45.83 mg/kg) CHI500 (86.52 mg/kg) และ CH (94.57 mg/kg) คิดเป็นร้อยละ 56.02, 16.97 และ 9.24 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ เช่นเดียวกับกระถางที่ปลูกข้าวพบว่าหน่วยการทดลอง MIC500 (37.47 mg/kg) มีปริมาณแคดเมียมในดินลดลงจากแคดเมียมเริ่มต้นคิดเป็นร้อยละ 64.03 รองลงมาได้แก่ MIC300 (47.55 mg/kg) CHI500 (87.30 mg/kg) และ CH (93.54 mg/kg) คิดเป็นร้อยละ 54.37, 16.22 และ 10.23 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมโดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมกำหนดให้ปริมาณแคดเมียมในดินไม่เกิน 37 mg/kg นั้น พบว่าในกระถางที่ไม่ปลูกข้าวมีเพียงหน่วยการทดลอง

MIC500 เท่านั้น ที่มีปริมาณแคดเมียมในดิน 36.45 mg/kg ซึ่งอยู่ในมาตรฐานคุณภาพดิน ๆ ที่กำหนดไว้

ด้านปริมาณแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของข้าว ได้แก่ รากข้าว ต้นข้าว เปลือกข้าว และเมล็ดข้าวขาว พบว่ามีการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าวมากกว่าส่วนอื่น และมีปริมาณแคดเมียม ในเปลือกข้าว น้อยที่สุด ทั้งนี้หน่วยการทดลอง CH มีการสะสมของแคดเมียมมากที่สุด ทุกส่วนของข้าว รองลงมา คือ CHI500 ,MIC300 และ MIC500 นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับ CH แล้วนั้น พบว่า หน่วยการทดลอง MIC500 มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในรากข้าว น้อยที่สุด เท่ากับ 2.77 mg/kg ซึ่งน้อยกว่า CH ร้อยละ 48.89 รองลงมาได้แก่ MIC300 (3.34 mg/kg) และ CHI500 (4.83 mg/kg) คิดเป็นร้อยละ 38.38 และ 10.89 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ ปริมาณแคดเมียมในต้นข้าว พบว่า CH มีการสะสมของแคดเมียมมากที่สุด 9.90 mg/kg เมื่อเปรียบเทียบกับ CH แล้ว พบว่า หน่วยการทดลอง MIC500 มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าว น้อยที่สุด เท่ากับ 2.98 mg/kg ซึ่งน้อยกว่า CH ร้อยละ 69.90 รองลงมาได้แก่ MIC300 (4.95 mg/kg) และ CHI500 (3.66 mg/kg) คิดเป็นร้อยละ 50.00 และ 63.00 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ และปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว โดยมาตรฐาน Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 0.20 mg/kg พบว่าหน่วยการทดลอง MIC500 และ CHI500 มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าวอยู่ในมาตรฐาน CCFAC โดยมีค่าเท่ากับ 0.19 mg/kg

ด้านการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว ได้แก่ น้ำหนักราก น้ำหนักต้น น้ำหนักเมล็ดข้าว และ จำนวนเมล็ด เมื่อเปรียบเทียบ CH กับหน่วยการทดลองอื่นด้านน้ำหนักรากข้าว พบว่า MIC500 และ CHI500 มีน้ำหนักเท่ากับ 40.31 g. ซึ่งมีน้ำหนักมากกว่า CH ร้อยละ 24.72 น้ำหนักต้นข้าว MIC500 และ MIC300 มีน้ำหนักมากกว่า CH ร้อยละ 16.44 และ 9.18 ตามลำดับ น้ำหนักเมล็ดข้าว MIC500, MIC300 และ CHI500 มีน้ำหนักน้อยกว่า CH ร้อยละ 14.41, 22.06 และ 26.09 โดยน้ำหนักเมล็ดข้าว จำนวนเมล็ดสมบูรณ์ และดัชนีการเก็บเกี่ยว มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันที่ CH มีค่ามากที่สุด

3. การหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ตาบ ทั้งในกระถางที่ไม่ปลูกพืชและกระถางปลูกพืชพบว่าใน 2 สภาวะหน่วยการทดลอง CHEM มีปริมาณแคดเมียมในดินมากที่สุด รองลงมาคือ P-T, MIC300 และ MIC500 ตามลำดับ โดยกระถางที่ไม่ปลูกข้าว นั้นมีปริมาณแคดเมียมในดินมากกว่ากระถางที่ปลูกข้าวพบว่าในกระถางที่ไม่ปลูกข้าว หน่วยการทดลอง MIC500 (33.14 mg/kg) มีปริมาณ

แคดเมียม ในดินลดลงจากแคดเมียมเริ่มต้น (89.35 mg/kg) คิดเป็นร้อยละ 62.91 รองลงมา ได้แก่ MIC300 (44.66 mg/kg) P-T (73.30 mg/kg) และ CHEM (79.50 mg/kg) คิดเป็นร้อยละ 50.01, 17.96 และ 11.02 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ เช่นเดียวกับกระถางที่ปลูกข้าวพบว่าหน่วยการทดลอง MIC500 (32.95 mg/kg) มีปริมาณแคดเมียมในดินลดลงจากแคดเมียมเริ่มต้นคิดเป็นร้อยละ 63.12 รองลงมา ได้แก่ MIC300 (35.02 mg/kg) P-T (49.02 mg/kg) และ CHEM (60.49 mg/kg) คิดเป็นร้อยละ 60.81, 45.14 และ 32.30 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่ามาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมกำหนดให้ปริมาณแคดเมียมในดินไม่เกิน 37 mg/kg นั้น พบว่าในกระถางที่ไม่ปลูกข้าวและกระถางที่ปลูกข้าวมีเพียงหน่วยการทดลอง MIC500 เท่านั้น ที่มีปริมาณแคดเมียมในดิน 33.14 mg/kg และ 32.30 mg/kg ซึ่งอยู่ในมาตรฐานคุณภาพดินที่กำหนดไว้

ด้านปริมาณแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของข้าว ได้แก่ รากข้าว ต้นข้าว เปลือกข้าว และเมล็ดข้าว พบว่าการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าวมากกว่าส่วนอื่น และมีปริมาณแคดเมียมในเปลือกข้าวน้อยที่สุด ทั้งนี้หน่วยการทดลอง CHEM มีการสะสมของแคดเมียมมากที่สุด ทุกส่วนของข้าว รองลงมา คือ P-T, MIC300 และ MIC500 นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับ CHEM แล้วนั้น พบว่า หน่วยการทดลอง MIC500 มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในรากข้าวน้อยที่สุด เท่ากับ 2.90 mg/kg ซึ่งน้อยกว่า CHEM ร้อยละ 50.51 รองลงมา ได้แก่ MIC300 (3.51 mg/kg) และ P-T (3.93 mg/kg) คิดเป็นร้อยละ 40.10 และ 32.93 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ ปริมาณแคดเมียมในต้นข้าว พบว่า CHEM มีการสะสมของแคดเมียมมากที่สุด 6.32 mg/kg เมื่อเปรียบเทียบกับ CHEM แล้ว พบว่า หน่วยการทดลอง MIC500 มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าวน้อยที่สุด เท่ากับ 2.64 mg/kg ซึ่งน้อยกว่า CHEM ร้อยละ 58.23 รองลงมา ได้แก่ MIC300 (3.21 mg/kg) และ P-T (4.73 mg/kg) คิดเป็นร้อยละ 49.21 และ 25.16 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ และปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว โดยมาตรฐาน Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 0.20 mg/kg พบว่าหน่วยการทดลอง MIC500 มีปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าวอยู่ในมาตรฐาน CCFAC โดยมีค่าเท่ากับ 0.15 mg/kg

ด้านการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว ได้แก่ น้ำหนักราก น้ำหนักต้น น้ำหนักเมล็ดข้าวและจำนวนเมล็ด เมื่อเปรียบเทียบ CHEM กับหน่วยการทดลองอื่นด้านน้ำหนักราก

ข้าวพบว่า MIC500 มีน้ำหนักรากข้าวเท่ากับ 28.54 g. มีค่ามากกว่า CHEM ร้อยละ 12.76 น้ำหนักต้นข้าว MIC500 และ MIC300 มีน้ำหนักน้อยกว่า CHEM ร้อยละ 12.99 และ 8.93 ตามลำดับ น้ำหนักเมล็ดข้าว MIC500, MIC300 และ P-T มีน้ำหนักน้อยกว่า CHEM ร้อยละ 3.45, 14.11 และ 31.68 โดยน้ำหนักเมล็ดข้าว และดัชนีการเก็บเกี่ยวมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันที่ CHEM มีค่ามากที่สุด

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า 1) การทดลองสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ หน่วยการทดลองที่ดีที่สุดคือ MIC500 มีปริมาณแคดเมียมในดินน้อยที่สุดเท่ากับ 36.45 mg/kg ลดลง ร้อยละ 65.02 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแคดเมียมในดินก่อนการทดลอง 104.2 mg/kg 2) การหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ดาวหน่วยการทดลองที่ดีที่สุดคือ MIC500 มีปริมาณแคดเมียมในดินน้อยที่สุดเท่ากับ 33.14 mg/kg ลดลง ร้อยละ 62.91 เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแคดเมียมในดินก่อนการทดลอง 89.35 mg/kg จากทั้ง 2 การทดลองในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ และดินปนเปื้อนแม่ดาวนั้น พบว่าสารชีวภัณฑ์สามารถ ลดการสะสมของแคดเมียมในดินได้ทั้งในดินที่เกิดการปนเปื้อนใหม่ โดยแคดเมียมจะยึดเหนี่ยวกับคาร์บอนเนต และดินที่เกิดการปนเปื้อนเป็นระยะเวลาอันยาวนานแคดเมียมในดินจะอยู่ในรูป iron manganese oxide bound และรูป organic matter bound และพบว่า ขณะที่ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณแคดเมียมในดินลดลง ทั้งนี้ปริมาณแคดเมียมในดินแปรผันตรงกับน้ำหนักต้น ความสูง ปริมาณแคดเมียมใน ราก ต้น และ เมล็ดข้าว อย่างมีนัยสำคัญที่ $P \leq 0.01$

อภิปรายผลการวิจัย

การทดสอบความทนของจุลินทรีย์ในสารชีวภัณฑ์ต่อความเข้มข้นของแคดเมียมพบว่าจากการจำแนกชนิดแบคทีเรียโดยวิธี 16s rDNA พบว่ามีแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ *Bacillus safensis* subsp. *safensis* และ *Bacillus safensis* subsp. *Osmophilus* มีความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่สามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย (Minimal Inhibitory Concentration; MIC) เท่ากับ 1,200 mg/L และความเข้มข้นต่ำสุดของแคดเมียมที่แบคทีเรียในสารชีวภัณฑ์ไม่สามารถเจริญได้ (Minimum bactericidal concentration: MBC) เท่ากับ 1,400 mg/L สอดคล้องกับ Farheen Nazli et al. (2020) *Bacillus safensis* เป็น rhizobacteria ที่สร้าง indole 3 acetic acid (IAA) พบว่าสามารถทนต่อแคดเมียม และสร้าง exopolysaccharides (EPS) ที่มีความสำคัญต่อ plant growth promoting (PGP) โดยความเข้มข้นของแคดเมียมในระดับต่ำสุด ที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของ

แบคทีเรียได้ (MIC) มีค่าระหว่าง 1,400–1,500 $\mu\text{g/ml}$ เช่นเดียวกับ Limcharoensuk *et al.* (2015) แยกไอโซเลทของแบคทีเรียจากดินและพบว่า *P.aeruginosa* มีความทนต่อแคดเมียมและสังกะสี โดยมีค่า MIC เท่ากับ 1,467 mg/L และ Zn เท่ากับ 2,590 mg/L โดยพบว่า *Bacillus safensis* สามารถเจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อและมีความเข้มข้นของแคดเมียมในระดับต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ (MIC) มีค่าเท่ากับ 100 mg/kg และมี % removal ระหว่าง 17.76–54.17 % (Ratan singh *et al.*, 2015)

ผลจากการทดลองพบว่าหน่วยการทดลองที่ไม่มีการปลูกข้าวมีปริมาณแคดเมียมในดิน การทดลองสกัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ และการหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ดาว พบว่าทั้งสองการทดลองมีแนวโน้มของปริมาณแคดเมียมไปในทิศทางเดียวกัน คือการทดลองที่ใช้ปุ๋ยเคมี และการทดลองที่ใช้ปุ๋ยอินทรีย์มีปริมาณแคดเมียมในดินมากกว่า การทดลองที่ใช้สารชีวภัณฑ์ ใน 3 ระยะการเจริญของพืช คือ Vegetative Phase Reproductive Phase และ Ripening Phase ในระยะ Reproductive Phase มีปริมาณแคดเมียมเพิ่มขึ้น เพราะการทดลอง CHEM มีการเติมปุ๋ยเคมีที่ใช้สำหรับการเพาะปลูกแต่ไม่มีการปลูกข้าวจึงเกิดการสะสมของแคดเมียมในดินทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะหนักกับสารอินทรีย์ในดิน โดยแอนไอออนของสารอินทรีย์ดูดซับแคดไอออนของโลหะหนักและแอนไอออนของสารอินทรีย์ สร้างสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนคู่กับโลหะ (B.Seshadri *et al.*, 2016) เกิดการสะสมของปุ๋ยตั้งแต่ระยะ Vegetative Phase ปริมาณแคดเมียมในดินเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Xiao-qing *et al.* (2018) กล่าวว่า การเติมปุ๋ยฟอสเฟตจะเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดินมากถึง 80–87% และความเข้มข้นของแคดเมียมในการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยมีค่าเพิ่มขึ้น 94.8 และ 276 $\mu\text{g/L}$ ในเวลา 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่มีการปลูกข้าวและการทดลองที่ไม่มีการปลูกข้าว พบว่าการใช้สารชีวภัณฑ์สามารถลดปริมาณแคดเมียมในดินได้ 20–30 % เช่นเดียวกันในการหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ดาวมีปริมาณแคดเมียมลดลงเพียงเล็กน้อย แต่จะลดลงมากถึง 35 % ในหน่วยการทดลองที่เติมสารชีวภัณฑ์ในปริมาณ 300 ml/น้ำ 200 L/rai (MIC 300) และหน่วยการทดลองที่เติมสารชีวภัณฑ์ในปริมาณ 500 ml/น้ำ 200 L/rai (MIC 500) เป็นผลมาจากการใช้เชื้อผสมของสารชีวภัณฑ์ซึ่งมีจุลินทรีย์หลายชนิดทำให้สามารถเพิ่ม binding sites บนพื้นผิวของเซลล์ได้มากขึ้นสามารถจับกับแคดไอออนของแคดเมียมได้ดีขึ้น (Pugazhendhi *et al.*, 2014) เป็นผลให้เมื่อสิ้นสุดระยะการเพาะปลูก คือ 120 วัน ปริมาณแคดเมียมใน MIC 300 และ

MIC500 มีค่าเท่ากับ 45.83 และ 36.45 mg/kg ในการทดลองสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ และ 44.66, 33.14 mg/kg ในการหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ตา ซึ่งทั้ง 2 การทดลอง MIC500 มีค่าอยู่ในมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัย และเกษตรกรรม โดยกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (ต้องไม่เกิน 37 mg/kg) ทั้งนี้พบว่าปริมาณแคดเมียมในดินลดลงตามระยะการเจริญเติบโตของข้าว คือ ระยะ Reproductive Phase และ Ripening Phase เป็นระยะที่ข้าวมีความต้องการธาตุอาหารของข้าวเพื่อการเจริญเติบโต และการสร้างผลผลิตสูงกว่าระยะอื่น

เมื่อพิจารณาปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวเปรียบเทียบกับหน่วยการทดลองที่มีการเติมสารชีวภัณฑ์กับการทดลอง CHEM และ OR (การทดลองที่ 1) P-T (การทดลองที่ 2) พบว่ามีปริมาณแคดเมียมลดลงและค่าเฉลี่ยปริมาณแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่ปลูกโดย CHEM มีค่าเท่ากับ 0.65 mg/kg (การทดลองที่ 1) และ 12.00 mg/kg (การทดลองที่ 2) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับรายงานการวิจัยผลการปลูกข้าวในดินแม่ตา แสดงให้เห็นว่ามีการปนเปื้อนของแคดเมียมในเมล็ดข้าว 0.04 ถึง 1.75 mg/kg โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.59 mg/kg (Anongnat et al, 2012) เช่นเดียวกับผลการศึกษาปริมาณแคดเมียมในข้าวพื้นที่ปลูกข้าวพันธุ์ขาวมะลิ 105 ของเกษตรกรที่อาศัยน้ำจากลุ่มน้ำแม่ตา บริเวณตำบลแม่ตา ตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก พบปริมาณแคดเมียมในข้าวสารอยู่ในช่วง 7.15–14.24 mg/kg (Thanapat, Thongchai and Arunsiri, 2014) มีค่ามากกว่ามาตรฐาน Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) ที่กำหนดไว้ที่ไม่เกิน 0.20 mg/kg ขณะที่การเติมสารชีวภัณฑ์ทำให้การสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าวลดลงมีค่าใกล้เคียงมาตรฐาน CCFAC มากที่สุด คือ ในการทดลองสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ MIC500 พบปริมาณแคดเมียม ในข้าว polished rice มีค่าไม่เกินมาตรฐาน Codex Committee on Food Additives and Contaminant (CCFAC) ที่กำหนดไว้ที่ไม่เกิน 0.20 mg/kg (0.19 ± 0.006 mg/kg) และการหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ตา MIC500 พบปริมาณแคดเมียม ในข้าว polished rice มีค่าใกล้เคียงมาตรฐาน CCFAC มากที่สุด คือ 0.22 mg/kg

จากการทดลองสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ มีค่า pH ในดินเท่ากับ 7.76 ส่วนการทดลองการหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ตา มีค่า pH ในดินเท่ากับ 5.41 จึงส่งผลให้แคดเมียมในดินหลังการทดลอง ในการทดลองสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลด

ปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ มีปริมาณแคดเมียมในหน่วยการทดลอง MIC500 มีปริมาณแคดเมียมในดิน เท่ากับ 36.45 mg/kg (กระถางไม่ปลูกข้าว) และ 37.48 mg/kg (กระถางปลูกข้าว) ซึ่งมากกว่าในการทดลองการหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ตัวมีปริมาณแคดเมียมในหน่วยการทดลอง MIC500 มีปริมาณแคดเมียมในดิน เท่ากับ 33.14 mg/kg (กระถางไม่ปลูกข้าว) และ 32.95 mg/kg (กระถางปลูกข้าว) ทั้งนี้เกิดจากค่า pH ที่แตกต่างกันในการทดลองที่มีค่า pH เป็นกรดปริมาณแคดเมียมในดินจึงน้อยกว่าทั้งนี้เนื่องจากเมื่อดินอยู่ในสภาพที่เป็นกรด ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในดินจะมีการแข่งขันกับโลหะหนักในดิน ส่งผลให้ในดินมีความสามารถในการดูดซับแคดไอออน (โลหะ) ต่ำลงและยังเป็นการเพิ่มการเคลื่อนที่ของโลหะหนัก (วรชาติ, 2555) แต่ในสภาพที่เป็นกรดการจับกับโลหะหนักของแบคทีเรียจะถูกจำกัดโดยการเพิ่มขึ้นของโปรตอนที่มาแย่งจับกับ anion binding site และการเพิ่ม พีเอช จะทำให้ประจุลบบริเวณผิวหน้าของเซลล์แบคทีเรียเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดดีขึ้นในแบคทีเรียพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักอยู่ที่พีเอช 4-7 สอดคล้องกับ Sanjukta (2016) ได้ ทดสอบเลี้ยง *Achromobacter* ในอาหารที่มี โลหะหนักพบว่าหลังจาก 5 วันมี pH เพิ่มขึ้น สูงสุดที่ 7.68 ทำให้กิจกรรมการย่อยลดลง 83.3 % เป็น 73.8% และการศึกษาของ Bhoopesh (2010) ที่ได้ศึกษาการ adsorp Cd ของ *B.subtilis* และ *shewanella oneidensis* ที่ pH 5.9 จำเพาะต่อ Cd คือ มี carboxyl and the phosphoryl sites โดยสามารถ adsorp ได้มากที่สุด 100-200 ppm ต่ำสุด 1 ppm และ 3 ppm

นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณแคดเมียมในดินยังส่งผลต่อการเจริญและผลผลิตของข้าวลดลงอีกด้วย ได้แก่ น้ำหนักราก น้ำหนักต้น น้ำหนักเมล็ดข้าว รวมถึงจำนวนเมล็ดสมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องมาจาก ภายใต้สภาวะที่มีแคดเมียมจะไปยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสง ได้แก่ คลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ส่งผลต่อผลผลิตและการเจริญของพืช ในการทดลองที่มีการใช้แบคทีเรียส่งผลให้คลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ไม่ใช้แบคทีเรีย เนื่องจากแคดเมียมทำให้น้ำตาลไรโบโลสฟอสเฟตและเอมไซม์ไรโบโลสฟอสเฟตคาร์บอกซิเลสลดลง ส่งผลให้กระบวนการสังเคราะห์แสงลดลง (Soumik Mitra et al., 2018)

ผลจากปริมาณแคดเมียมในดินและผลผลิตของข้าวที่ลดลง ทั้ง 2 การทดลองนั้น จากการทดสอบความทนทานของจุลินทรีย์ในสารชีวภัณฑ์ต่อความเข้มข้นของแคดเมียมพบว่าจากการจำแนกชนิดแบคทีเรียโดยวิธี 16s rDNA พบว่ามีแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ *Bacillus safensis* subsp.safensis และ *Bacillus safensis* subsp. Osmophilus และการทดลองสัดส่วนของสาร

ชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียม ในดินปนเปื้อนสังเคราะห์ ในกระถางที่ไม่ปลูกพืชและกระถางปลูกพืชพบว่าใน 2 สภาวะหน่วยการทดลอง CH มีปริมาณแคดเมียมในดินมากที่สุด รองลงมาคือ CHI500, MIC300 และ MIC500 ตามลำดับ โดยกระถางที่ไม่ปลูกข้าวนั้นมีปริมาณแคดเมียมในดินมากกว่ากระถางที่ปลูกข้าวพบว่าในกระถางที่ไม่ปลูกข้าวหน่วยการทดลอง MIC500 (36.45 mg/kg) มีปริมาณแคดเมียมในดินลดลงจากแคดเมียมเริ่มต้น (104.2 mg/kg) คิดเป็นร้อยละ 65.02 และการหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแม่ดาว โดยกระถางที่ไม่ปลูกข้าวนี้มีปริมาณแคดเมียมในดินมากกว่ากระถางที่ปลูกข้าวพบว่าในกระถางที่ไม่ปลูกข้าวหน่วยการทดลอง MIC500 (33.14 mg/kg) มีปริมาณแคดเมียมในดินลดลงจากแคดเมียมเริ่มต้น (89.35 mg/kg) คิดเป็นร้อยละ 62.91 ทั้งนี้จากการการศึกษาของ Bhoopesh, (2010) ที่ได้ศึกษาการ adsorp Cd ของ *B.subtilis* และ *shewanella oneidensis* ที่ pH 5.9 พบว่าแบคทีเรียที่มีความจำเพาะต่อ Cd คือ มี carboxyl and the phosphoryl sites โดยสามารถ adsorp ได้มากที่สุด 100–200 ppm รวมทั้ง ความทนทานต่อสภาวะที่มี Cd มีความสัมพันธ์ต่อการ uptake โลหะหนัก (Sanjukta, 2016) และการศึกษาการตอบสนองของ *Aspergillus* ภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของ Cd ต่างกัน ในสภาวะที่มี Cd ปริมาณมากทำให้เกิด stress ส่งผลให้กระตุ้น antioxidant enzyme ใน *Aspergillus* (Todorova, 2008) ประกอบกับ Xiaoyan Lin et al., (2016) พบว่า Cd resisting bacterial มีความสามารถในการยับยั้งการนำแคดเมียมเข้าสู่รากพืช และลดความเป็นพิษของแคดเมียมต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยการเพิ่มจำนวน binding site บน cell surface และ Jitendra Mishra et al. (2017) ได้อธิบายกลไกการลดปริมาณปนเปื้อนโลหะหนัก (Cd, Cu,Pb และ Zn) ของจุลินทรีย์ว่าเป็น Heavy metal tolerant plant growth promoting (HMT-PGP) โดยจุลินทรีย์บริเวณรากพืชจะดึงดูดโลหะหนัก และปล่อยไฮโดรเจน (H⁺) ร่วมกับกรดอินทรีย์ เพื่อเปลี่ยนรูปของโลหะหนักที่ไม่ละลายน้ำ ให้อยู่ในรูปที่สามารถละลายน้ำได้ จากนั้น จะถูกจับไว้ด้วย Metal binding proteins (MBP) ที่ผนังเซลล์เป็น Protein metal complex (PMC) ซึ่ง MBP ประกอบด้วย metallothionines, (กลุ่มโปรตีนที่มีกรดอะมิโนซิสเทอีนสามารถจับกับโลหะหนัก เช่น แคดเมียม ปรอท เงิน สารหนูได้ดีด้วยหมู่ไซซอล) phytochelatins (ยีนที่มีส่วนสำคัญต่อการสะสมและทนต่อโลหะหนักแคดเมียม) และ siderophores (สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กที่แบคทีเรียสร้างและปล่อยออกมา) เพื่อช่วยในการจับโลหะหนักจากภายนอกเข้าสู่ภายในเซลล์แบบ active transport ซึ่งนำโลหะหนักไปใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ของแบคทีเรีย ทั้งการเจริญ การเพิ่มจำนวนและเมแทบอลิซึม การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ Heavy metal tolerant plant growth promoting (HMT-PGP) โดยจุลินทรีย์ คือ การเปลี่ยนรูปของโลหะหนักจากอนินทรีย์ให้เป็นอินทรีย์ให้อยู่ในรูปที่เป็น

พืชปล่อยลงพืชจึงสามารถนำเข้าสู่เซลล์ได้ จากนั้นจุลินทรีย์จะปล่อยสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช เช่น IAA, ACC deaminase ,siderophores บริเวณรากพืชโดยพืชขนส่งโลหะหนักและสะสมในส่วนต่าง ๆ Metal Binding Protein (MBP) ที่ผนังเซลล์ จับกับโลหะหนักเป็น LMW-MBP metal complex และขนส่งเข้าสู่แวคคิวโอล โดยโปรตีน ABC transporter และแลกเปลี่ยน H^+ โดย CAX transporter รวมเป็น HMW-MBP-metal complex เพื่อเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์แสง และปลดปล่อยโลหะหนักในรูปของสารระเหยได้ (Volatile From)

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

1. จากการทดสอบประสิทธิภาพของสารชีวภัณฑ์สามารถ ลดมลพิษในดิน (แคดเมียม) ได้ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการป้องกัน หรือแก้ไขปัญหามลพิษจากสารเคมีที่ตกค้างในดิน เพื่อลดระยะเวลา ในการขอรับรองมาตรฐานเกษตรอินทรีย์
2. ควรส่งเสริมเกษตรกรใช้สารชีวภัณฑ์ที่มีมาตรฐานและใช้เชื้อที่มีประสิทธิภาพผ่านการทดสอบว่าสามารถลดมลพิษได้จริง เพื่อสามารถปลูกพืชผักอินทรีย์ได้โดยไม่ต้องรอกถึง 3 ปี
3. เนื่องจากโลหะหนักเป็นองค์ประกอบของสารกำจัดศัตรูพืชที่ใช้ในพื้นที่การเกษตร จึงสามารถประยุกต์ใช้สารชีวภัณฑ์กับดินมลพิษที่มีธาตุโลหะหนักใกล้เคียงกับแคดเมียมได้ เช่น การปนเปื้อนของโลหะหนัก CU Mg Zn เป็นต้น
4. ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาหาสัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้สารชีวภัณฑ์ที่สามารถลดปริมาณแคดเมียมในดินภายในกระถางทดสอบ แต่ยังไม่ได้ทดสอบในพื้นที่จริง จึงควรมีการศึกษาทดสอบในพื้นที่จริงอีกครั้งเพื่อยืนยันข้อมูล ก่อนการนำไปใช้จริงในพื้นที่นาข้าว
5. สามารถประยุกต์ใช้สารชีวภัณฑ์รวมกับการใช้พืชบำบัด (phytoremediation) ในการกำจัดหรือบำบัดมลพิษดินในอนาคตได้

บรรณานุกรม

- จุไรรัตน์ อิมินา. (2557). การย่อยสลายสารไกลโฟเสททางชีวภาพของแบคทีเรียที่แยกได้จากดินในพื้นที่เพาะปลูก. วิทยานิพนธ์ วท.ม., มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- ธนภัทร ปลื้มพวง , จันทรจักรัส วีรสาร , อรุณศิริ กำลิ่ง และธงชัย มาลา. (2558). การปนเปื้อนแคดเมียมในดินและการสะสมในผลผลิตข้าวบนพื้นที่ตำบลแม่ตาวและ ตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. **วารสารเกษตรพระวรุณ**, 12(1), 1–8.
- ธนภัทร ปลื้มพวง, ธงชัย มาลา และอรุณศิริ กำลิ่ง. (2557). ปริมาณแคดเมียมในข้าวที่ปลูกในดินนาปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาวจังหวัดตาก ประเทศไทย. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 3(2), 26–38.
- รชาติ วิศวิพัฒน์. (2555). เทคโนโลยีการบำบัดดินปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวัสดุฟอสเฟต. **วารสารแก่นเกษตร**, (40), 373–378.
- วนิดา โนบรรเทา, พิชิต พงษ์สกุล, สุรสิทธิ์ อรรถจารุสิทธิ์ และสุรทิน แก้วโรจน์. (2558). ผลกระทบของโลหะหนักในวัสดุอินทรีย์ต่อคุณภาพของดินและพืช. กลุ่มงานวิจัยเคมีดิน กลุ่มวิจัยปฐพีวิทยา กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร.
- วาสนา วิรุณรัตน์ วิภา นิลวงศ์ ปรีดา นาเทเวศร์ และนงลักษณ์ ปุระณะพงษ์. (2557). ศึกษาเปรียบเทียบผลจากการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพบางประการของดินในระบบการปลูกผักอินทรีย์. รายงานผลการวิจัย เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ศูนย์ข้อมูลข่าวสารอาเซียน กรมประชาสัมพันธ์. (2561). **สินค้าเกษตรไทยส่งออกอาเซียน ปี 2561 เน้นรักษามาตรฐานและเพิ่มคุณภาพผลผลิต เข้มมั่นสินค้าเกษตรไทย สู่อุตสาหกรรมโลก**. สืบค้นเมื่อ 17 มีนาคม 2563 จาก http://www.asean thai.net/ewt_news.php?nid=8068 & filename =index
- สมพร เรืองศรี. (2556). **แนวทางการลดการสะสมโลหะหนักในพื้นที่ผลิตผักชุมชนเมือง จ.สระบุรี**. วิทยานิพนธ์ วท.ม., มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สายชล สุขญาณกิจ และธนวรรณ พาณิชพัฒน์ (ผู้บรรยาย). (6–7 ธันวาคม 2555). การเปรียบเทียบการใช้ทานตะวันและข้าวฟ่างในการดูดซับตะกั่ว ที่ปนเปื้อนในดินบ้านคิลีตี้ จังหวัดกาญจนบุรี. การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9 (หน้า 428–436). นครปฐม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยา

เขตกำแพงแสน.

สุธาสิณี อึ้งสูงเนิน. (2558). ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืช.

วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
ประจำเดือน มกราคม-เมษายน 2558 9(1), (50-63).

สถาบันการจัดการระบบสุขภาพ ม.สงขลานครินทร์. (2561). การประเมินผลกระทบทาง

สุขภาพ (HIA) ด้านการจัดการระบบอาหารปลอดภัยจังหวัดนครศรีธรรมราช.
สืบค้นเมื่อ 17 มีนาคม 2563 จาก <http://hsmi2.psu.ac.th/food/project/184> .

สำนักงานหลักประกันสุขภาพแห่งชาติ (สปสช.). (2562). ผลกระทบทางสุขภาพของวัตถุ

อันตรายทางการเกษตร. สืบค้นเมื่อ 17 มีนาคม 2563 จาก <https://www.tcijthai.com/news/2019/10/scoop /9456>.

อารีย์ สุตระอุดม, มินตรา สุมาลี และปิยะดา วชิระวงศ์กร (ผู้บรรยาย). (19-20 ธันวาคม 2556). การ

ประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนัก ในการปลูกหอมแดง. **การประชุมวิชาการวิจัย
รำไพพรรณี ครั้งที่ 7.** (หน้า 439-442). จันทบุรี: มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี.
มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี.

อัจฉราพร ขำโสภณ. (2550). การจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยการมีส่วนร่วม

**ร่วมระหว่างภาครัฐ ภาคเอกชนและภาคประชาชน กรณีศึกษา ลุ่มน้ำแม่ตาบ อ.
แม่สอด จ.ตาก.** รายงานการวิจัย กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยมหิดล.

N. Abdus-Salam and M. O. Bello. (2015). Kinetics, thermodynamics and competitive adsorption of lead and zinc ions onto termite mound. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 2016(270), 3417-3426.

Anongnat Sriprachote , Pornthiwa Kanyawongha , Kumiko Ochiai and Toru Match. (2012). Current situation of cadmium-polluted paddy soil, rice and soybean in the Mae Sot District, Tak Province, Thailand. **Soil Science and Plant Nutrition**, 2016(270), 349 — 359.

Aomi, S. and Tomoyuki, M. (2016). Functional effects of manganese and iron oxides on the dynamics of trace elements in soils with a special focus on arsenic and cadmium: A review. **Geoderma**, 2016(270), 68-75.

B.Seshadri et al., (2016). Phosphorus-cadmium interactions in Paddy soils. **Geoderma**, 2016(270), 43-59.

- Baba H, Tsuneyama et al., (2013). The liver in itai-itai disease (chronic cadmium poisoning): pathological features and metallothionein expression. **Modern Pathology**, 2016(270), 1228–1234.
- Channa Jayasumana, Sarath Gunatilake and Priyantha Senanayake. (2014). Glyphosate Hard Water and Nephrotoxic Metals: Are They the Culprits Behind the Epidemic of Chronic Kidney Disease of Unknown Etiology in Sri Lanka. *Int. J. Environ. Res. Public Health.*, 2016(270), 2125–2147.
- Cooper, D. G. Macdonald, S.C.R. Duff, B.J. and Kosaric, N. (1981). Enhanced Production of Surfactin from *Bacillus subtilis* by Continuous Product Removal and Metal Cation Additions. **Biological Sciences**, 2016(270), 406–412.
- Delog, M. Jua, L. Tiao, L. Yogi, L. Migli, Y. Jin, H., ... Huaqun, Y. (2018). Effects of redox potential on soil cadmium solubility: Insight into microbial community. **ENVIRONMENTAL SCIENCES 75**, 2013(75), 224–232.
- Faiyz, A.S. and Garawany, M. (2007). Impact of Phosphate Fertilizer on Cadmium Accumulation in Soil and Vegetable Crops. **Bull Environ Contam Toxicol**, 2007(78), 358–362.
- Francesca, P. Carolina, C.V and Luigu, T. (2010). Isolation and quantification of cadmium removal mechanisms in batch reactors inoculated by sulphate reducing bacteria: Biosorption versus bioprecipitation. **Bioresource Technology**, 2010(101), 2981–2987.
- Farheen Nazli, Moazzam Jamil, Azhar Hussain, Tanveer Hussain. (2020). Exopolysaccharides and indole-3-acetic acid producing *Bacillus safensis* strain FN13 potential candidate for phytostabilization of heavy metals. **Environ Monit Assess**, 2020(192), 738–754
- Gaoxiang, H. Changfeng, D. Zhigao, Z. Taolin, Z. Xingxing, W. (2018). A tillering application of zinc fertilizer based on basal stabilization reduces Cd accumulation in rice. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 2019(167), 338–344.
- Hayato, B. Koichi, T. Megumi, Y. Kohei, N. Takashi, M. Tatsuhiro, T., ... Kazuhiro, N. (2013). The liver in itai-itai disease (chronic cadmium poisoning): pathological features and metallothionein expression. **Modern Pathology**, 2013(26), 229–1234
- Luo, L.Y. et al., (2019). Bacterial community response to cadmium contamination of

- agricultural paddy soil. **Applied Soil Ecology**, 2019(139), 100–106.
- Martin Imseng et al., (2018). Towards an understanding of the Cd isotope fractionation during transfer from the soil to the cereal grain. **Environmental Pollution**, 2019(244), 834–844.
- Matthias Wiggerhauser et al., (2018). Using isotopes to trace freshly applied cadmium through mineral phosphorus fertilization in soil–fertilizer–plant systems. **Science of the Total Environment**, 2019(648), 779–786.
- Mohammad, O. Mohammad, S.K. and Almas, Z. (2012). Biosorption of heavy metals by *Bacillus thuringiensis* strain OSM29 originating from industrial effluent contaminated north Indian soil. **Biological Sciences**, 2013(20), 121–129.
- Office of Land Development Science. (2013). **Standard types of agricultural product to Certified by the Land Development Department**. Retrieved April 3, 2019, from https://www.ldd.go.th/link_q/standard/4.htm.
- Office of Occupational and Environmental Diseases. (2014). **Knowledge of disease**. Retrieved April, 3, 2019, from <http://envocc.ddc.moph.go.th>
- Perry, R. and Silver, S. (1981). Cadmium and Manganese Transport in *Staphylococcus aureus* Membrane Vesicles. **JOURNAL OF BACTERIOLOGY**, 1982(150), 973–976.
- Prattana Phuekvilai, Yotsawate Sirichamorn and Ninnara Yookongkaew. (2018). Arsenic Accumulation of Dominant Herbaceous Plants Growing around Gold Mine Areas. **Journal of Science and Technology**, 2016(270), 110–123.
- Pugazhendhi, A. Dhivya, S. Valsala, H. and Thamaraiselvi, K. (2014). Removal of cadmium from aqueous solution by batch studies using *Bacillus cereus*. **Ecological Engineering**, 2014(71), 728–735.
- Qian Sun et al., (2019). Formation of Cd precipitates on γ -Al₂O₃: Implications for Cd sequestration in the environment. **Environment International**, 2019(126), 234–241.
- Quan Zhang et al., (2018). The influence of liming on cadmium accumulation in rice grains via iron-reducing bacteria. **Science of the Total Environment**, 2016(270), 109–118.
- R. A. Wuana; F. E. Okieimen; J. A. Imborvungu. (2020). Removal of heavy metals from a contaminated soil using organic chelating acids. **Environ. Sci. Tech.**, 7(3), 485–496.

- Robert D. Perry and Simon Silver. (1990). Cadmium and manganese transport in *Staphylococcus aureus* membrane vesicles. **Journal of Bacteriology**, 2016(270), 973–976.
- Robert, W. Simmons, A. Noble, P. Pongsakul, O. and Sukreeyaporn, N.C. (2012). Cadmium–hazard mapping using a general linear regression model (Irr–Cad) for rapid risk assessment. **Environ Geochem Health**, 2013(20), 121–129.
- Roberts, T.L.. (2014). Cadmium and Phosphorous Fertilizers: The Issues and the Science. **Procedia Engineering**, 2014(83), 52–59.
- Saichon Sookyannakit and Thanawan Phanichpat. (2013). Comparison of Growth and Lead Accumulation of Sunflower and Sorghum in Lead Contaminated Soil. **KKU Science Journal**, 2016(270),996–1007.
- Seija, V. and Markku, P. (2017). Oxidation of iron sulfides in subsoils of cultivated boreal acid sulfate soil fields – based on soil redox potential and pH measurements. **Geoderma**, 2017(308), 252–259.
- Sriprachote, A. Kanyawongha, P. Ochiai, K. and Match, T. (2018). Current situation of cadmium–polluted paddy soil, rice and soybean in the Mae Sot District, Tak Province, Thailand. **Soil Science and Plant Nutrition**, 2012(58), 349–359.
- Thanapat Pluemphuck, Thongchai Mala and Arunsiri Kumlung. (2014). Cadmium Contents in Rice Grown in Cd Contaminated Paddy Fields in Mae Tao Floodplains Tak Province Thailand. **Journal of Science and Technology**, 2016(270), 26–38.
- ng Wei et al., (2018). Effects of salicylic acid, Fe(II) and plant growth–promoting bacteria on Cd accumulation and toxicity alleviation of Cd tolerant and sensitive tomato genotypes. **Journal of Environmental Management**, 2018(214), 164–171.
- Tossapol Limcharoensuk et al., (2015). Bioaccumulation and biosorption of Cd⁽²⁺⁾ and Zn⁽²⁺⁾ by bacteria isolated from a zinc mine in Thailand. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2015(122), 322–330.
- Weichang, J. Zhogqiu, C. Dan, L. Wuzhong, N. (2012). Identifying the Criteria of Cadmium Pollution in Paddy Soils Based on a Field Survey. **Energy Procedia**, 2012(16), 27–31.
- Xiao, Q.H. et al., (2018). Release of cadmium in contaminated paddy soil amended with NPK fertilizer and lime under water management. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 2018(159), 38–45.

- Xiaoyan Lin et al., (2016). Characterization of cadmium-resistant bacteria and their potential for reducing accumulation of cadmium in rice grains. **Science of the Total Environment**, 2016(270), 97–104.
- Yongbig, J. Shimeg, J. Zhangbbao, L. Xinpei, Y. Zhixiog, Q. and Renzhi, H. (2019). Field scale remediation of Cd and Pb contaminated paddy soil using three mulberry (*Morus alba* L.) cultivars. **Ecological Engineering**, 2019(129), 38–44.
- Yongbing Jiang, Shimeng Jiang, Zhangbao Li, Xinpei Yan, Zhixiong Qin, and Renzhi Huang. (2019). Field scale remediation of Cd and Pb contaminated paddy soil using three mulberry (*Morus alba* L.) cultivars. **Ecological Engineering**, 2016(270), 38–44.
- Yunya, P. Luc, B. Gerwin, K. Jing, S. Yongming, L. Erwin, T. and Rob, C. (2012). Solubility of trace metals in two contaminated paddy soils exposed to alternating flooding and drainage. **Geoderma**, 2016(261), 59–69.



ภาคผนวก ก มาตรฐานปริมาณแคดเมียมในดินและในข้าว

ตาราง 27 แสดงค่ามาตรฐานปริมาณแคดเมียมในดิน

มาตรฐานปริมาณแคดเมียมในดิน	แคดเมียม (mg/kg)
1. เกษตรอินทรีย์	20
2. ระดับเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักในดิน กลุ่มประเทศสหภาพยุโรป	3
3. ระดับเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักในดิน ประเทศไทย	0.15
4. ค่าสูงสุดที่ยอมรับให้มีได้ในปุ๋ยอินทรีย์	5
5. กรมควบคุมมลพิษ	37

ตาราง 28 แสดงค่ามาตรฐานปริมาณแคดเมียมในอาหาร

มาตรฐานปริมาณแคดเมียมในข้าว	แคดเมียม (mg/kg)
1. CODEX (Codex Committee on Food Additives and Contaminant)	0.2
2. European Communities	0.2
3. Food Standard Australia New Zealand.	0.1

มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม

มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรมมาตรฐานคุณภาพดินโดยกรมควบคุมมลพิษ ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน ดิพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 121 ตอนพิเศษ 119 ง ลงวันที่ 20 ตุลาคม 2547 มีรายละเอียดดังนี้

ตาราง 29 มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม

ดัชนีคุณภาพดิน	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	วิธีการตรวจวัด
1. สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compound)			
1) เบนซีน (Benzene)	มิลลิกรัม/ กิโลกรัม	ต้องไม่เกิน 6.5	ใช้วิธี Gas Chromatography หรือ วิธี Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS) หรือวิธีอื่น ที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
2) คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride)	"	ต้องไม่เกิน 2.5	"
3) 1,2-ไดคลอโรอีเทน (1,2- Dichloroethane)	"	ต้องไม่เกิน 3.5	"
4) 1,1-ไดคลอโรเอเททิลีน (1,1- Dichloroethylene)	"	ต้องไม่เกิน 0.5	"
5) ซิส-1,2-ไดคลอโรเอเททิลีน (cis-1,2-Dichloroethylene)	"	ต้องไม่เกิน 43	"
6) ทรานส์-1,2-ไดคลอโรเอเททิลีน (trans-1,2- Dichloroethylene)	"	ต้องไม่เกิน 63	"
7) ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane)	"	ต้องไม่เกิน 89	"
8) แเอทิลเบนซีน (Ethylbenzene)	"	ต้องไม่เกิน 230	"
9) สไตรีน (Styrene)	"	ต้องไม่เกิน 1,700	"
10) เตตระคลอโรเอเททิลีน (Tetrachloroethylene)	"	ต้องไม่เกิน 57	"
11) โทลูอีน (Toluene)	"	ต้องไม่เกิน 520	"
12) ไตรคลอโรเอเททิลีน (Trichloroethylene)	"	ต้องไม่เกิน 28	"
13) 1,1,1-ไตรคลอโรอีเทน (1,1,1-Trichloroethane)	"	ต้องไม่เกิน 630	"
14) 1,1,2-ไตรคลอโรอีเทน (1,1,2-Trichloroethane)	"	ต้องไม่เกิน 8.4	"
15) ไซลีนทั้งหมด (Total Xylenes)	"	ต้องไม่เกิน 210	"

ตาราง 29 (ต่อ)

2. โลหะหนัก (Heavy metals)			
1) สารหนู (Arsenic)	มิลลิกรัม/ กิโลกรัม	ต้องไม่เกิน 3.9	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธี Atomic Absorption, Gaseous Hydride หรือวิธี Atomic Absorption, Borohydride Reduction หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
2) แคดเมียมและสารประกอบแคดเมียม (Cadmium and compounds)	"	ต้องไม่เกิน 37	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Direct Aspiration หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
3) โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	"	ต้องไม่เกิน 300	ใช้วิธี Coprecipitation หรือวิธี Colorimetric หรือวิธี Chelation/Extraction หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
4) ตะกั่ว (Lead)	"	ต้องไม่เกิน 400	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Direct Aspiration หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ

ตาราง 29 (ต่อ)

2. โลหะหนัก (Heavy metals)			
5) แมงกานีสและสารประกอบแมงกานีส (Manganese and compounds)	"	ต้องไม่เกิน 1,800	"
6)ปรอทและสารประกอบปรอท (Mercury and compounds)	"	ต้องไม่เกิน 23	ให้ใช้วิธี Cold-Vapor Technique หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
7) นิกเกิลในรูปของเกลือที่ละลายน้ำได้ (Nickel, soluble salts)	"	ต้องไม่เกิน 1,600	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Direct Aspiration หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
8) ซีลีเนียม (Selenium)	"	ต้องไม่เกิน 390	ใช้วิธี Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry หรือวิธี Atomic Absorption, Furnace Technique หรือวิธี Atomic Absorption, Gaseous Hydride หรือวิธี Atomic Absorption, Borohydride Reduction หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
3. สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticides)			
1)อะทราซีน (Atrazine)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม	ต้องไม่เกิน 22	ใช้วิธี Gas Chromatography หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
2) คลอเดน (Chlordane)	"	ต้องไม่เกิน 16	ใช้วิธี Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS) หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
3) 2,4-ดี (2,4-D)	"	ต้องไม่เกิน 690	ใช้วิธี Gas Chromatography หรือวิธี High Performance Liquid

ตาราง 29 (ต่อ)

3. สารป้องกันกำจัดศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticides)			
			Chromatography/Thermal Extraction/Gas Chromatography/Mass Spectrometry (TE/GC/MS) หรือวิธี อื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
4) ดีดีที (DDT)	"	ต้องไม่เกิน 17	ใช้วิธี Gas Chromatography หรือ วิธี Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS) หรือวิธีอื่น ที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
5) ดีลดริน (Dieldrin)	"	ต้องไม่เกิน 0.3	"
6) เฮปตาคลอรั (Heptachlor)	"	ต้องไม่เกิน 1.1	"
7) เฮปตาคลอรั อีพ็อกไซด์ (Heptachlor Epoxide)	"	ต้องไม่เกิน 0.5	"
8) ลินเดน (Lindane)	"	ต้องไม่เกิน 4.4	"
9) เพนตะคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	"	ต้องไม่เกิน 30	ใช้วิธี Gas Chromatography หรือ วิธี Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS) หรือวิธี Gas Chromatography/Fourier Transform Infrared (GC/FT-IR) Spectrometry หรือวิธีอื่นที่ กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
4. สารพิษอื่น ๆ			
1) เบนโซ (เอ) ไพรีน (Benzo (a) pyrene)	"	ต้องไม่เกิน 0.6	ใช้วิธี Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS) หรือวิธี Thermal Extraction/Gas Chromatography/Mass Spectrometry (TE/GC/MS) หรือวิธี Gas Chromatography/Fourier Transform Infrared (GC/FT-IR) Spectrometry หรือวิธีอื่นที่กรม ควบคุมมลพิษเห็นชอบ

ตาราง 29 (ต่อ)

4. สารพิษอื่น ๆ			
2) ไซยาไนด์และสารประกอบ ไซยาไนด์ (Cyanide and compounds)	"	ต้องไม่เกิน 11	ใช้วิธี Total and Amenable Cyanide: Distillation หรือวิธี Total Amenable Cyanide (Automated Colorimetric, with off-line Distillation) หรือวิธี Cyanide Extraction Procedure for Solids and Oils หรือวิธีอื่นที่กรมควบคุม มลพิษเห็นชอบ
3) พีซีบี (PCBs)	"	ต้องไม่เกิน 2.2	ใช้วิธี Gas Chromatography หรือ วิธีอื่นที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ
4) ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl Chloride)	"	ต้องไม่เกิน 1.5	ใช้วิธี Gas Chromatography หรือ วิธี Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS) หรือวิธีอื่น ที่กรมควบคุมมลพิษเห็นชอบ

หมายเหตุ: 1. วิธี Test Methods of Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods (SW-846) ขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency)

2. วิธีการเก็บและรักษาตัวอย่างดินให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้ในภาคผนวกท้ายประกาศนี้

ภาคผนวก ข สมการที่ใช้ในการคำนวณปริมาณแคดเมียมในดิน และในข้าว

1. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้สารชีวภัณฑ์ โดยใช้สมการ Percent metal removed และ Removal / efficiency ดังนี้

$$\text{Percent metal removed (\%)} = \frac{C_1 V_1 \times 100}{C_s V_s} \quad (3)$$

กำหนดให้

C_1	คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักใน supernatant (mg/L)
V_1	คือ ปริมาตรของ supernatant (L)
C_s	คือ ความเข้มข้นของโลหะหนักใน ดิน (mg/kg)
V_s	คือ น้ำหนักแห้งของดิน

$$\text{Removal / efficiency (RE)} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \quad (4)$$

กำหนดให้

C_0	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น (Initial concentrations)
C_1	คือ ความเข้มข้นทันที (Instant concentrations)

$$\text{Bioaccumulation factor} = \frac{\text{Cd concentration in rice tissues}}{\text{Cd concentration given in seed bed}} \quad (5)$$

ที่มา: Soumik Mitra, (2018)

$$\% \text{ Biosorption (Percentage metal removal)} = [(C_i - C_f) / C_i] \times 100 \quad (6)$$

กำหนดให้

C_i	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น
C_f	คือ ความเข้มข้นสุดท้าย

Specific metal uptake or metal biosorbed by the tested biomass (mg metal/g dry biomass weight)

$$Q = [V \times (C_i - C_f)] / (1000 \times M) \quad (7)$$

กำหนดให้

Q	คือ ปริมาณการกำจัดโลหะหนักจำเพาะ (mg metal /g biosorbent)
V	คือ ปริมาตรของสารละลายโลหะ (ml)
C_i	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะในสารละลาย (mg/L)
C_f	คือ ความเข้มข้นสุดท้ายของโลหะในสารละลาย (mg/L)
M	คือ มวลของสารดูดซับชีวภาพ (g)

ที่มา: Marilen and Patnica, (2007)

$$\text{Bio concentration factor (BCF)} = \frac{\text{Metal concentration in plant shoot}}{\text{Metal concentration in soil}} \quad (8)$$

$$\text{Translocation factor (TF)} \quad (9)$$

$$\text{TF} = \frac{\text{Metal concentration in plant shoot}}{\text{Metal concentration in plant root}}$$

$$\text{Total Cd} = C_{\text{root}} \times DW_{\text{root}} + C_{\text{shoot}} \times DW_{\text{shoot}} + C_{\text{brown rice}} \times DW_{\text{brown rice}}$$

$$\text{TF}_{\text{root - shoot}} = C_{\text{shoot}} / C_{\text{root}}$$

$$\text{TF}_{\text{shoot - brown rice}} = C_{\text{brown rice}} / C_{\text{shoot}}$$

$$C_{\text{brown rice}} = \text{ความเข้มข้นของ Cd หรือ ปริมาณของ Cd ในข้าว}$$

$$C_{\text{shoot}} = \text{ความเข้มข้นของ Cd หรือ ปริมาณของ Cd ในข้าว}$$

$$DW_{\text{root}} = \text{น้ำหนักแห้งของราก}$$

$$DW_{\text{shoot}} = \text{น้ำหนักแห้งของยอด}$$

$$DW_{\text{brown rice}} = \text{น้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าว}$$

ที่มา: Yongbing jiang et al, (2019)

การอ่านผลทั้งสองการทดสอบนี้ใช้วิธีการอ่านผลคือ นับปริมาณเชื้อแล้วนำปริมาณเชื้อที่อยู่ในช่วง 25 - 250 โคโลนี มาคำนวณตามสูตร ดังต่อไปนี้

$$n = \frac{\sum c}{(1 \times n_1) + (0.1 \times n_2) \times d}$$

$$\sum c = \text{ผลรวมโคโลนีทั้งหมดที่นับได้ในช่วง 25 - 250 โคโลนี}$$

$$n_1 = \text{จำนวนเพลทที่นับได้ใน dilution แรก}$$

$$n_2 = \text{จำนวนเพลทที่นับได้ใน dilution ที่สอง}$$

$$d = \text{dilution แรกที่นับได้}$$

ภาคผนวก ค ตารางผลการทดลอง

ตาราง 30 ข้อมูลปริมาณแคดเมียมในดิน : ไม้ปลูกข้าว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)								
		Vegetative Phase			Reproductive Phase			Ripening Phase		
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	CH	96.12±0.06 ^a	0.00	0.13	95.91±0.09 ^a	0.00	0.20	94.57±0.06 ^a	0.01	0.13
2	OR	83.38±0.14 ^g	0.01	0.30	80.93±0.26 ^f	0.01	0.59	77.45±0.14 ^g	0.01	0.30
3	MIC100	83.35±0.02 ^g	0.00	0.04	80.63±0.06 ^g	0.00	0.13	78.82±0.02 ^f	0.00	0.04
4	MIC200	70.56±0.06 ^h	0.00	0.13	69.41±0.10 ^h	0.01	0.21	67.48±0.06 ^h	0.01	0.13
5	MIC300	50.30±0.16 ⁱ	0.00	0.35	48.72±0.15 ⁱ	0.00	0.33	45.83±0.16 ⁱ	0.00	0.35
6	MIC400	48.31±0.06 ^j	0.00	0.14	47.57±0.16 ^j	0.01	0.35	43.73±0.06 ^j	0.01	0.14
7	MIC500	38.38±0.14 ^k	0.01	0.30	37.53±0.11 ^k	0.01	0.24	36.45±0.14 ^k	0.01	0.30
8	CHI100	93.70±0.01 ^b	0.00	0.02	92.63±0.01 ^b	0.00	0.03	91.60±0.01 ^b	0.00	0.02
9	CHI200	90.52±0.01 ^c	0.00	0.03	89.68±0.01 ^c	0.00	0.01	88.48±0.01 ^c	0.00	0.03
10	CHI300	90.43±0.03 ^c	0.00	0.07	89.56±0.07 ^c	0.00	0.15	88.36±0.03 ^c	0.01	0.07
11	CHI400	89.85±0.01 ^d	0.00	0.03	87.70±0.01 ^d	0.00	0.03	87.28±0.01 ^d	0.00	0.03
12	CHI500	88.65±0.01 ^e	0.00	0.03	86.78±0.01 ^e	0.00	0.03	86.52±0.01 ^e	0.00	0.03
13	MCH100	83.71±0.14 ^g	0.00	0.32	80.66±0.14 ^g	0.00	0.28	78.61±0.14 ^f	0.00	0.32
14	MCH200	70.54±0.06 ^h	0.00	0.14	69.63±0.05 ^h	0.00	0.11	67.48±0.05 ^h	0.00	0.12
15	MCH300	50.50±0.07 ⁱ	0.00	0.17	48.49±0.09 ⁱ	0.00	0.19	45.51±0.05 ⁱ	0.00	0.11
16	MCH400	48.18±0.01 ^j	0.00	0.03	47.72±0.02 ^j	0.00	0.04	43.86±0.02 ^j	0.00	0.05
17	MCH500	38.46±0.01 ^k	0.00	0.03	37.46±0.01 ^k	0.00	0.03	36.46±0.01 ^k	0.00	0.02

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี

Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 31 ข้อมูลปริมาณแคดเมียมในดิน : ปลูกข้าว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)								
		Vegetative Phase			Reproductive Phase			Ripening Phase		
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	CH	93.54±0.11 ^a	0.00	0.25	92.35±0.06 ^a	0.00	0.13	93.54±0.22 ^a	0.00	0.49
2	OR	80.48±0.28 ^f	0.00	0.62	79.20±0.23 ^e	0.01	0.50	80.48±0.33 ^f	0.01	0.74
3	MIC100	80.55±0.05 ^g	0.00	0.11	79.37±0.18 ^e	0.00	0.39	80.55±0.09 ^f	0.00	0.19
4	MIC200	68.53±0.13 ^g	0.00	0.28	67.29±0.17 ^f	0.00	0.39	68.53±0.20 ^g	0.00	0.45
5	MIC300	47.55±0.08 ^h	0.01	0.19	46.61±0.06 ^g	0.01	0.13	47.55±0.09 ⁱ	0.01	0.20
6	MIC400	46.71±0.09 ⁱ	0.00	0.20	45.35±0.14 ⁱ	0.00	0.31	46.71±0.18 ^j	0.00	0.41
7	MIC500	37.48±0.11 ^j	0.01	0.24	36.40±0.15 ^j	0.01	0.34	37.48±0.09 ^m	0.00	0.21
8	CHI100	90.50±0.01 ^b	0.00	0.03	89.93±0.01 ^b	0.00	0.03	90.50±0.01 ^b	0.00	0.02
9	CHI200	89.61±0.01 ^c	0.00	0.02	87.30±0.01 ^c	0.00	0.03	89.61±0.01 ^c	0.00	0.02
10	CHI300	89.50±0.13 ^c	0.00	0.30	87.26±0.00 ^c	0.00	0.01	89.50±0.21 ^c	0.00	0.48
11	CHI400	87.89±0.03 ^d	0.00	0.06	85.88±0.01 ^d	0.00	0.03	87.89±0.01 ^d	0.00	0.02
12	CHI500	87.30±0.01 ^e	0.00	0.03	85.70±0.02 ^d	0.00	0.04	87.30±0.02 ^e	0.00	0.04
13	MCH100	80.50±0.12 ^f	0.00	0.27	79.32±0.05 ^e	0.00	0.12	80.50±0.09 ^f	0.02	0.19
14	MCH200	68.62±0.06 ^g	0.00	0.13	67.31±0.07 ^f	0.00	0.15	65.55±0.04 ^h	0.00	0.08
15	MCH300	47.56±0.06 ^h	0.00	0.14	46.13±0.03 ^h	0.00	0.06	44.49±0.05 ^k	0.00	0.11
16	MCH400	46.93±0.06 ⁱ	0.00	0.14	45.92±0.01 ^h	0.00	0.02	40.52±0.02 ⁱ	0.00	0.04
17	MCH500	37.54±0.02 ^j	0.00	0.05	36.16±0.01 ^j	0.00	0.03	35.47±0.03 ⁿ	0.00	0.06

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธี

Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 32 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในรากข้าว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)		
		\bar{x}	C.V.	S.D.
1	CH	5.42±0.15 ^c	0.06	0.33
2	OR	4.60± 0.20 ^c	0.10	0.45
3	MIC100	3.96 ±0.13 ^d	0.07	0.29
4	MIC200	3.58 ±0.04 ^{def}	0.02	0.09
5	MIC300	3.34 ±0.26 ^{fgh}	0.17	0.57
6	MIC400	2.92 ±0.14 ^{ghi}	0.11	0.32
7	MIC500	2.77 ±0.00 ⁱ	0.00	0.00
8	CHI100	6.11±0.12 ^a	0.04	0.26
9	CHI200	6.10±0.22 ^a	0.08	0.49
10	CHI300	5.42±0.17 ^c	0.07	0.39
11	CHI400	5.06±0.35 ^{bc}	0.15	0.77
12	CHI500	4.83±0.16 ^c	0.08	0.37
13	MCH100	3.92 ±0.03 ^{de}	0.02	0.07
14	MCH200	3.67 ±0.11 ^{def}	0.06	0.24
15	MCH300	3.41 ±0.21 ^{egf}	0.14	0.48
16	MCH400	2.84 ±0.13 ^{hi}	0.11	0.30
17	MCH500	2.95 ±0.18 ^{ghi}	0.14	0.40

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธี

Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 33 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)		
		\bar{x}	C.V.	S.D.
1	CH	9.90±0.93 ^a	0.21	2.08
2	OR	6.65±0.17 ^c	0.06	0.38
3	MIC100	6.30±0.06 ^{cd}	0.02	0.14
4	MIC200	5.65±0.20 ^{de}	0.08	0.45
5	MIC300	4.95±0.20 ^e	0.09	0.45
6	MIC400	3.73±0.17 ^{fg}	0.10	0.38
7	MIC500	2.98±0.00 ^g	0.00	0.00
8	CHI100	9.34±0.19 ^{ab}	0.04	0.37
9	CHI200	9.26±0.31 ^d	0.07	0.69
10	CHI300	8.98±0.15 ^{ab}	0.04	0.33
11	CHI400	8.55±0.20 ^b	0.05	0.45
12	CHI500	3.66±0.54 ^{fg}	0.29	1.08
13	MCH100	6.50±0.09 ^{cd}	0.03	0.21
14	MCH200	6.34±0.18 ^{cd}	0.06	0.39
15	MCH300	5.68±0.18 ^{de}	0.07	0.40
16	MCH400	4.04±0.19 ^f	0.11	0.43
17	MCH500	3.08±0.15 ^g	0.11	0.34

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี

Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 34 ขอบเขตปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว

No	Treatment	Rice hulls			Polished rice			Rice in the husks		
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	CH	0.140±0.007 ^a	0.11	0.02	0.51±0.007 ^a	0.03	0.02	0.65±0.01 ^a	0.04	0.02
2	OR	0.124±0.004 ^b	0.07	0.01	0.47±0.008 ^{bc}	0.04	0.02	0.59±0.01 ^b	0.03	0.02
3	MIC100	0.110±0.004 ^c	0.09	0.01	0.45 ±0.009 ^{cd}	0.05	0.02	0.56±0.01 ^c	0.05	0.03
4	MIC200	0.105±0.003 ^{cd}	0.06	0.01	0.37±0.004 ^f	0.02	0.01	0.47±0.00 ^e	0.01	0.01
5	MIC300	0.092±0.004 ^{de}	0.09	0.01	0.30±0.008 ^h	0.06	0.02	0.39±0.01 ^g	0.04	0.02
6	MIC400	0.076±0.002 ^g	0.08	0.01	0.26±0.014 ^k	0.11	0.03	0.33±0.01 ^h	0.10	0.03
7	MIC500	0.054±0.00 ²ⁱ	0.11	0.01	0.19±0.006 ^l	0.05	0.01	0.24±0.00 ^j	0.00	0.00
8	CHI100	0.132±0.004 ^{ab}	0.06	0.01	0.47±0.004 ^b	0.02	0.01	0.61±0.01 ^b	0.02	0.01
9	CHI200	0.130±0.003 ^{ab}	0.05	0.01	0.39±0.003 ^e	0.02	0.01	0.52±0.01 ^d	0.02	0.01
10	CHI300	0.110±0.006 ^c	0.12	0.01	0.32±0.003 ^g	0.02	0.01	0.43±0.00 ^f	0.02	0.01
11	CHI400	0.096±0.005 ^{cd}	0.13	0.01	0.28±0.006 ^{ij}	0.05	0.01	0.37±0.01 ^g	0.06	0.02
12	CHI500	0.070±0.006 ^{gh}	0.20	0.01	0.19±0.002 ^l	0.03	0.01	0.26±0.01 ⁱ	0.05	0.02
13	MCH100	0.110±0.000 ^c	0.00	0.000	0.44 ±0.006 ^d	0.03	0.013	0.55±0.01 ^c	0.03	0.02
14	MCH200	0.108±0.004 ^c	0.07	0.008	0.37±0.006 ^f	0.04	0.013	0.48±0.01 ^e	0.04	0.02
15	MCH300	0.084±0.002 ^{ef}	0.06	0.005	0.29±0.004 ^{hi}	0.03	0.008	0.37±0.00 ^g	0.03	0.01
16	MCH400	0.073±0.003 ^{gh}	0.05	0.006	0.26±0.004 ^k	0.03	0.009	0.34±0.01 ^h	0.04	0.01
17	MCH500	0.062±0.004 ^{hi}	0.14	0.008	0.21±0.004 ^l	0.04	0.009	0.27±0.01 ⁱ	0.06	0.02

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 35 ข้อมูลความสูงของต้นข้าว

No.	Treatment	Height (cm.)											
		Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	S.D.
1	CH	61.80±0.58 ^{efg}	0.02	1.30	10.06	97.20±4.50 ^a	0.10	10.06	142.80±8.88 ^{cd}	0.14	19.87	19.87	
2	OR	58.20±1.36 ^{gh}	0.05	3.03	0.45	81.80±0.20 ^{bcd}	0.01	0.45	107.50±7.79 ^f	0.15	15.59	15.59	
3	MIC100	52.40±3.87 ^h	0.17	8.65	1.52	80.60±0.68 ^{bcd}	0.02	1.52	138.80±5.72 ^d	0.09	12.79	12.79	
4	MIC200	96.75±0.75 ^d	0.01	1.06	1.41	82.00±0.71 ^{bcd}	0.02	1.41	139.75±4.99 ^d	0.09	9.98	9.98	
5	MIC300	79.60±2.06 ^{bcd}	0.06	4.62	0.82	81.00±0.41 ^{bcd}	0.01	0.82	154.80±4.07 ^{abc}	0.06	9.09	9.09	
6	MIC400	82.80±3.43 ^b	0.09	7.66	2.77	84.20±1.24 ^{bc}	0.03	2.77	156.40±2.16 ^{abc}	0.03	4.83	4.83	
7	MIC500	83.80±1.07 ^b	0.03	2.39	2.07	84.40±0.93 ^{bc}	0.02	2.07	160.80±4.66 ^a	0.06	10.43	10.43	
8	CHI100	41.80±1.07 ⁱ	0.06	2.39	5.32	77.75±2.66 ^{de}	0.07	5.32	124.80±1.88 ^e	0.03	4.21	4.21	
9	CHI200	53.40±1.44 ^h	0.06	3.21	3.16	74.00±1.41 ^e	0.04	3.16	132.80±3.53 ^{de}	0.06	7.89	7.89	
10	CHI300	66.40±1.33 ^e	0.04	2.97	3.39	74.00±1.52 ^e	0.05	3.39	139.00±3.59 ^d	0.06	8.03	8.03	
11	CHI400	80.80±2.94 ^{bc}	0.08	6.57	2.39	80.80±1.07 ^{bcd}	0.03	2.39	146.80±3.06 ^{bcd}	0.05	6.83	6.83	
12	CHI500	63.00±1.41 ^{ef}	0.05	3.16	3.90	82.20±1.74 ^{bcd}	0.05	3.90	165.40±1.78 ^d	0.02	3.97	3.97	
13	MCH100	56.20±1.50 ^{gh}	0.06	3.35	3.63	79.20±1.62 ^{cde}	0.05	3.63	142.75±3.77 ^{cd}	0.05	7.54	7.54	
14	MCH200	74.00±1.00 ^d	0.02	1.73	2.70	82.60±1.21 ^{bcd}	0.03	2.70	144.60±4.51 ^{cd}	0.07	10.09	10.09	
15	MCH300	75.40±1.03 ^{cd}	0.03	2.30	2.05	84.85±0.91 ^{bc}	0.02	2.05	154.59±2.52 ^{abc}	0.04	5.64	5.64	
16	MCH400	84.20±1.53 ^b	0.04	3.42	4.15	84.20±1.85 ^{bc}	0.05	4.15	158.80±2.35 ^{ab}	0.03	5.26	5.26	
17	MCH500	66.00±1.58 ^e	0.05	3.54	1.10	85.20±0.49 ^b	0.01	1.10	165.40±1.91 ^c	0.03	4.28	4.28	

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างในในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 36 ข้อมูลจำนวนต้น

No.	Treatment	Number of trees (Tree)								
		Vegetative Phase			Reproductive Phase			Ripening Phase		
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	CH	2.00±0.00 ^a	0.00	0.00	2.80±0.37 ^{ef}	0.30	0.84	9.00±0.00 ^a	0.00	0.00
2	OR	2.00±0.00 ^d	0.00	0.00	3.20±0.37 ^{de}	0.26	0.84	7.60±0.40 ^{bc}	0.12	0.89
3	MIC100	2.00±0.00 ^d	0.00	0.00	2.00±0.45 ^f	0.50	1.00	5.80±0.58 ^e	0.22	1.30
4	MIC200	2.00±0.00 ^d	0.00	0.00	3.00±0.00 ^{de}	0.00	0.00	6.20±0.37 ^{def}	0.13	0.84
5	MIC300	2.00±0.00 ^a	0.27	0.00	3.50±0.29 ^{cde}	0.16	0.58	7.00±0.45 ^{cde}	0.14	1.00
6	MIC400	2.00±0.00 ^d	0.00	0.00	3.20±0.20 ^{de}	0.14	0.45	7.00±0.32 ^{cde}	0.10	0.71
7	MIC500	2.00±0.00 ^d	0.00	0.00	3.40±0.24 ^{cde}	0.16	0.55	7.20±0.37 ^{bcd}	0.12	0.84
8	CHI100	2.00±0.00 ^d	0.00	0.00	3.40±0.24 ^{cde}	0.16	0.55	5.60±0.40 ^f	0.16	0.89
9	CHI200	2.00±0.00 ^d	0.00	0.00	3.40±0.24 ^{cde}	0.16	0.55	6.00±0.32 ^{def}	0.12	0.71
10	CHI300	3.20±0.37 ^b	0.26	0.84	5.20±0.37 ^{ab}	0.16	0.84	7.60±0.24 ^{bc}	0.07	0.55
11	CHI400	4.00±0.00 ^a	0.00	0.00	4.40±0.24 ^{bc}	0.12	0.55	8.50±1.50 ^{ab}	0.25	2.12
12	CHI500	4.00±0.00 ^a	0.00	0.00	5.40±0.40 ^a	0.17	0.89	8.20±0.20 ^{abc}	0.05	0.45
13	MCH100	2.25±0.25 ^d	0.22	0.50	2.80±0.37 ^{ef}	0.30	0.84	5.60±0.24 ^f	0.10	0.55
14	MCH200	2.40±0.24 ^{cd}	0.23	0.55	3.20±0.20 ^{de}	0.14	0.45	7.20±0.37 ^{bcd}	0.12	0.84
15	MCH300	2.00±0.00 ^d	0.00	0.00	3.60±0.40 ^{cde}	0.25	0.89	7.80±0.37 ^{abc}	0.11	0.84
16	MCH400	3.00±0.32 ^{bc}	0.24	0.71	3.80±0.37 ^{cde}	0.22	0.84	8.25±0.25 ^{abc}	0.06	0.50
17	MCH500	3.40±0.24 ^{ab}	0.16	0.55	4.00±0.32 ^{cd}	0.18	0.71	8.50±0.29 ^{ab}	0.07	0.58

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี

Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 37 ข้อมูลน้ำหนักรากขาว

No.	Treatment	Weight of Roots (g.)											
		Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	S.D.
1	CH	7.20±0.00 ^a	0.00	0.00	0.00	31.77±1.12 ^{hi}	0.07	0.07	2.24	32.32±0.84 ^b	0.06	0.06	1.46
2	OR	3.75±0.34 ^{cde}	0.28	0.68	0.68	31.68±0.61 ^{hi}	0.04	0.04	1.36	32.14 ±3.60 ^h	0.16	0.16	5.09
3	MIC100	3.63±0.17 ^{de}	0.10	0.37	0.37	31.94±1.01 ^{hi}	0.07	0.07	2.26	37.32±1.06 ^{de}	0.06	0.06	2.38
4	MIC200	3.94±0.32 ^{bcd}	0.18	0.71	0.71	33.07±1.20 ^{gh}	0.08	0.08	2.68	37.60±0.41 ^{cde}	0.02	0.02	0.93
5	MIC300	4.05±0.14 ^{bcd}	0.08	0.31	0.31	40.48±0.70 ^{bcd}	0.04	0.04	1.57	38.18±0.66 ^{bcd}	0.04	0.04	1.46
6	MIC400	4.19±0.49 ^{bcd}	0.26	1.10	1.10	41.97±0.60 ^{abc}	0.03	0.03	1.35	38.73±0.58 ^{bcd}	0.03	0.03	1.29
7	MIC500	4.32±0.39 ^{bcd}	0.20	0.88	0.88	42.90±1.37 ^{cb}	0.07	0.07	3.06	40.31±0.21 ^{ab}	0.01	0.01	0.47
8	CHI100	3.64±0.08 ^{de}	0.05	0.18	0.18	29.94±0.78 ^{ij}	0.06	0.06	1.73	34.94 ±0.67 ^g	0.04	0.04	1.51
9	CHI200	3.36±0.12 ^e	0.08	0.27	0.27	28.42±0.66 ^j	0.05	0.05	1.49	36.67±0.90 ^{ef}	0.04	0.04	1.55
10	CHI300	4.31±0.31 ^{bcd}	0.37	0.63	0.63	37.98±1.02 ^{ef}	0.06	0.06	2.29	34.00 ±0.84 ^{gh}	0.06	0.06	1.88
11	CHI400	3.75±0.38 ^{cde}	0.23	0.86	0.86	39.09±1.09 ^{de}	0.06	0.06	2.44	37.53±1.21 ^{cde}	0.05	0.05	1.70
12	CHI500	3.45±0.18 ^e	0.11	0.39	0.39	39.68±1.06 ^{cde}	0.06	0.06	2.36	40.00±0.00 ^{abc}	0.00	0.00	0.00
13	MCH100	3.39±0.15 ^e	0.10	0.34	0.34	29.77±0.57 ^j	0.04	0.04	1.27	39.34±0.33 ^{abcd}	0.02	0.02	0.74
14	MCH200	3.67±0.14 ^d	0.09	0.32	0.32	35.60±0.99 ^g	0.06	0.06	2.22	37.68±0.41 ^{cde}	0.02	0.02	0.93
15	MCH300	4.55±0.14 ^{bc}	0.07	0.31	0.31	41.47±0.71 ^{bcd}	0.04	0.04	1.59	38.84±0.31 ^{bcd}	0.02	0.02	0.69
16	MCH400	4.39±0.15 ^{bcd}	0.08	0.34	0.34	43.14±0.77 ^{ab}	0.04	0.04	1.71	37.79±0.40 ^{cde}	0.02	0.02	0.89
17	MCH500	4.64±0.15 ^b	0.07	0.33	0.33	44.40±0.64 ^a	0.03	0.03	1.43	41.50±1.14 ^a	0.05	0.05	1.97

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างในในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 38 ข้อมูลน้ำหนักต้นซาก

No.	Treatment	Weight of Tree (g.)											
		Vegetative Phase			Reproductive Phase			Ripening Phase					
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	CH	20.04±1.74 ^{ghi}	0.19	3.89	37.29±1.90 ^g	0.11	4.24	60.05±2.05 ^{def}	0.08	4.60			
2	OR	19.54±1.17 ^{hi}	0.13	2.62	70.19±1.91 ^{ab}	0.14	3.81	61.01±2.45 ^{cdef}	0.09	5.48			
3	MIC100	23.20±1.46 ^{efg}	0.11	2.53	61.27±1.18 ^{de}	0.04	2.64	60.70±1.79 ^{cdef}	0.07	3.99			
4	MIC200	25.55±0.62 ^{cde}	0.04	1.07	63.49±1.80 ^{cd}	0.06	4.03	64.16±2.11 ^{bcd}	0.07	4.71			
5	MIC300	30.13±0.79 ^b	0.05	1.58	64.47±1.88 ^{cd}	0.07	4.21	65.56±1.05 ^{abcd}	0.04	2.34			
6	MIC400	29.18±0.32 ^b	0.02	0.72	65.81±1.04 ^{bcd}	0.04	2.33	65.87±0.61 ^{abcd}	0.02	1.37			
7	MIC500	34.91±1.41 ^a	0.08	2.82	70.09±0.56 ^{ab}	0.02	1.25	69.92±1.21 ^{ab}	0.04	2.70			
8	CHI100	17.05±0.20 ^j	0.03	0.46	58.09±1.17 ^e	0.05	2.62	53.01±2.01 ^g	0.08	4.50			
9	CHI200	23.48±1.07 ^{ef}	0.10	2.40	53.00±0.48 ^e	0.02	1.08	57.23±2.22 ^g	0.09	4.96			
10	CHI300	29.12±0.00 ^b	0.00	0.00	62.22±0.71 ^{cde}	0.03	1.59	56.46±1.77 ^g	0.07	3.96			
11	CHI400	26.95±0.43 ^{bcd}	0.04	0.97	62.87±1.33 ^{cd}	0.05	2.98	59.10±3.19 ^{ef}	0.12	7.12			
12	CHI500	34.19±1.53 ^a	0.10	3.42	69.65±2.90 ^{ab}	0.09	6.49	60.04±2.74 ^{def}	0.10	6.13			
13	MCH100	22.12±0.95 ^{gh}	0.09	1.90	58.46±1.26 ^e	0.05	2.82	60.84±1.74 ^{cdef}	0.06	3.88			
14	MCH200	24.38±1.32 ^{def}	0.12	2.95	64.60±0.77 ^{cd}	0.03	1.72	64.02±1.13 ^{bcd}	0.04	2.53			
15	MCH300	29.81±0.66 ^b	0.05	1.49	63.77±1.19 ^{cd}	0.04	2.67	66.54±0.99 ^{abc}	0.03	2.21			
16	MCH400	28.30±0.71 ^{bc}	0.06	1.58	66.07±1.55 ^{bc}	0.05	3.48	67.91±0.96 ^{ab}	0.03	2.14			
17	MCH500	35.03±0.98 ^a	0.06	2.19	71.12±0.63 ^a	0.02	1.41	70.48±0.75 ^a	0.02	1.67			

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 39 ข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest index: HI)

No.	Treatment	Harvest index: HI		
		\bar{x}	C.V.	S.D.
1	CH	1.02±0.10 ^a	0.23	0.23
2	OR	0.49±0.03 ^{cd}	0.16	0.08
3	MIC100	0.75±0.02 ^b	0.05	0.04
4	MIC200	0.75±0.03 ^b	0.08	0.05
5	MIC300	0.80±0.02 ^b	0.07	0.05
6	MIC400	0.78±0.02 ^b	0.06	0.03
7	MIC500	0.80±0.01 ^b	0.04	0.03
8	CHI100	0.35±0.02 ^e	0.11	0.04
9	CHI200	0.36±0.01 ^e	0.09	0.03
10	CHI300	0.42±0.01 ^{de}	0.04	0.01
11	CHI400	0.55±0.02 ^c	0.08	0.04
12	CHI500	0.79±0.05 ^b	0.14	0.11
13	MCH100	0.70±0.03 ^b	0.09	0.06
14	MCH200	0.77±0.01 ^b	0.04	0.03
15	MCH300	0.81±0.04 ^b	0.08	0.05
16	MCH400	0.82±0.04 ^b	0.07	0.05
17	MCH500	0.80±0.04 ^b	0.12	0.10

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี

Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 40 ข้อมูลผลผลิตของข้าว

No.	Treatment	Number of grain						Weight of Grain (g)					
		Full Grain			Grain Blighted								
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	CH	913.00±15.38 ^a	0.11	96.14	142.67±1.89 ^a	0.19	26.63	32.05±42.99 ^a	0.12	3.78			
2	OR	608.00±2.68 ^h	0.15	90.85	48.00 ±0.45 ^{gh}	0.11	5.35	16.25±40.63 ^g	0.05	0.78			
3	MIC100	688.60±0.86 ^g	0.02	12.58	62.80±0.35 ^b	0.03	1.92	22.55±5.63 ^{ef}	0.03	0.79			
4	MIC200	721.20±0.00 ^{efg}	0.02	11.73	59.00±0.43 ^{bcd}	0.00	0.00	23.71±5.25 ^{def}	0.04	0.85			
5	MIC300	780.00±2.22 ^{bcd}	0.04	32.34	50.20±0.03 ^{cde} ^{efgh}	0.10	4.97	24.98±14.46 ^{cde}	0.00	0.04			
6	MIC400	820.20±1.29 ^b	0.01	9.68	45.40 ±0.10 ^{dhi}	0.06	2.88	25.89±4.33 ^{bcd}	0.01	0.14			
7	MIC500	888.40±2.38 ^a	0.01	11.99	32.40 ±0.28 ^j	0.16	5.32	27.43±5.36 ^{bc}	0.02	0.62			
8	CHI100	373.80±1.00 ^k	0.08	29.46	55.00±0.12 ^{bcd} ^{efg}	0.04	2.24	9.28±13.17 ⁱ	0.03	0.27			
9	CHI200	380.20±1.72 ^k	0.05	12.93	55.60±0.21 ^{bcd} ^{ef}	0.03	3.85	10.21±5.78 ^{hi}	0.07	0.46			
10	CHI300	468.20±1.93 ^j	0.05	25.74	52.80±0.25 ^{bcd} ^{ffg}	0.05	4.32	11.92±11.51 ^h	0.08	0.57			
11	CHI400	545.20±1.08 ^l	0.09	25.17	48.60 ±0.63 ^{efgh}	0.05	2.41	15.99±11.26 ^g	0.05	1.41			
12	CHI500	749.20±2.52 ^{cde}	0.04	33.66	41.20 ±1.26 ^{hij}	0.14	5.63	23.43±15.05 ^{def}	0.12	2.81			
13	MCH100	673.00±0.58 ^g	0.04	26.65	60.20±0.35 ^{bc}	0.02	1.30	21.26±11.92 ^f	0.04	0.78			
14	MCH200	732.60±0.58 ^{def}	0.01	10.31	59.20±0.48 ^{bcd}	0.02	1.30	24.81±4.61 ^{cde}	0.04	1.06			
15	MCH300	794.40±4.09 ^{bc}	0.01	8.85	58.40±0.62 ^{bcd}	0.16	9.15	25.01±3.96 ^{cde}	0.06	1.39			
16	MCH400	828.40±1.66 ^b	0.01	10.90	49.20 ±0.52 ^{defgh}	0.08	3.70	25.99±4.87 ^{bcd}	0.04	1.16			
17	MCH500	909.40±3.41 ^a	0.04	39.88	37.20 ±1.53 ^{ij}	0.21	7.63	28.41±17.84 ^b	0.12	3.43			

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 41 ข้อมูลปริมาณแคดเมียมในดิน : ไม้ปลูกขาว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)											
		Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	P-T	72.42 ± 0.03 ^b	0.00	0.04	74.23 ± 0.75 ^b	0.01	1.06	73.30 ± 1.39 ^b	0.03	1.06	73.30 ± 1.39 ^b	0.03	2.41
2	CHEM	87.51 ± 0.25 ^a	0.01	0.55	81.78 ± 0.61 ^a	0.01	1.06	79.50 ± 0.47 ^a	0.01	1.06	79.50 ± 0.47 ^a	0.01	0.94
3	MIC300	66.67 ± 0.78 ^c	0.02	1.55	55.47 ± 0.52 ^c	0.02	0.90	44.66 ± 0.55 ^c	0.02	0.90	44.66 ± 0.55 ^c	0.02	0.94
4	MIC500	64.95 ± 1.73 ^c	0.06	3.86	43.14 ± 1.07 ^d	0.06	2.39	33.14 ± 0.47 ^d	0.03	2.39	33.14 ± 0.47 ^d	0.03	0.94

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean ± SE)

ตาราง 42 ข้อมูลปริมาณแคดเมียมในดิน : ปลูกขาว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)											
		Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	P-T	67.65 ± 0.78 ^b	0.02	1.36	53.44 ± 0.84 ^d	0.04	1.89	49.02 ± 0.43 ^a	0.07	1.89	49.02 ± 0.43 ^a	0.07	0.61
2	CHEM	80.00 ± 0.72 ^a	0.02	1.62	73.47 ± 0.79 ^b	0.02	1.76	60.49 ± 0.78 ^a	0.02	1.76	60.49 ± 0.78 ^a	0.02	1.35
3	MIC300	62.71 ± 0.89 ^c	0.03	1.98	51.15 ± 0.71 ^b	0.03	1.58	35.02 ± 0.70 ^c	0.04	1.58	35.02 ± 0.70 ^c	0.04	1.57
4	MIC500	61.90 ± 1.91 ^c	0.04	2.70	42.52 ± 0.61 ^c	0.03	1.22	32.95 ± 1.25 ^c	0.07	1.22	32.95 ± 1.25 ^c	0.07	2.16

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean ± SE)

ตาราง 43 ข้อมูลปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน : ไม้ปลูกขาว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)											
		Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	S.D.
1	P-T	28.65±0.32 ^b	0.02	0.63	0.63	28.50±0.00 ^{ns}	0.00	0.00	0.00	28.26±0.36 ^b	0.03	0.03	0.03
2	CHEM	29.82±0.00 ^a	0.00	0.00	0.00	29.50±0.00 ^{ns}	0.00	0.00	0.00	28.54±0.00 ^{ab}	0.00	0.00	0.00
3	MIC300	29.74±0.00 ^a	0.00	0.00	0.00	29.48±0.00 ^{ns}	0.00	0.00	0.00	29.32±0.00 ^a	0.00	0.00	0.00
4	MIC500	29.93±0.23 ^a	0.02	0.46	0.46	29.44±0.00 ^{ns}	0.00	0.00	0.00	28.87±0.00 ^{ab}	0.00	0.00	0.00

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 44 ข้อมูลปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน : ปลูกขาว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)											
		Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	S.D.
1	P-T	27.52±0.19 ^b	0.02	0.43	0.43	26.71±0.74 ^b	0.03	0.37	0.37	25.18±0.67 ^a	0.06	0.06	0.06
2	CHEM	28.55±0.28 ^{ab}	0.02	0.63	0.63	27.10±20.52 ^{ab}	0.02	0.26	0.26	26.30±0.33 ^{ab}	0.03	0.03	0.03
3	MIC300	28.82±0.56 ^a	0.04	1.25	1.25	27.72±0.58 ^a	0.02	0.29	0.29	27.54±0.00 ^a	0.00	0.00	0.00
4	MIC500	28.44±0.09 ^{ab}	0.01	0.21	0.21	27.83±0.00 ^a	0.00	0.00	0.00	27.66±0.00 ^a	0.00	0.00	0.00

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 45 ขอบมูลปริมาณไนโตรเจนในดิน : ไม้ปลูกขาว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)											
		Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	P-T	3.80±0.01 ^d	0.00	0.02	3.74±0.01 ^c	0.00	0.02	3.67±0.01 ^b	0.00	0.02	3.67±0.01 ^b	0.00	0.01
2	CHEM	4.22±0.01 ^a	0.01	0.03	4.52±0.02 ^a	0.01	0.04	4.50±0.01 ^a	0.01	0.04	4.50±0.01 ^a	0.00	0.01
3	MIC300	3.87±0.01 ^c	0.00	0.01	3.85±0.01 ^b	0.00	0.02	3.81±0.01 ^c	0.00	0.02	3.81±0.01 ^c	0.00	0.02
4	MIC500	3.95±0.00 ^b	0.00	0.01	3.85±0.01 ^b	0.00	0.01	3.82±0.01 ^b	0.00	0.01	3.82±0.01 ^b	0.00	0.01

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 46 ขอบมูลปริมาณไนโตรเจนในดิน : ปลูกขาว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)											
		Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	P-T	3.58±0.01 ^c	0.00	0.02	3.43±0.01 ^d	0.00	0.01	3.40±0.01 ^d	0.00	0.01	3.40±0.01 ^d	0.00	0.01
2	CHEM	3.92±0.04 ^a	0.02	0.09	3.81±0.01 ^a	0.01	0.02	3.64±0.01 ^a	0.01	0.02	3.64±0.01 ^a	0.00	0.01
3	MIC300	3.62±0.01 ^c	0.00	0.02	3.70±0.01 ^c	0.01	0.02	3.60±0.01 ^c	0.01	0.02	3.60±0.01 ^c	0.00	0.02
4	MIC500	3.83±0.01 ^b	0.01	0.02	3.75±0.01 ^b	0.00	0.01	3.63±0.00 ^b	0.00	0.01	3.63±0.00 ^b	0.00	0.01

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 47 ข้อมูลปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ : ไม้ปลูกขาว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)											
		Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	P-T	8.83±0.33 ^a	0.08	0.73	8.48±0.21 ^b	0.06	0.47	7.37±0.44 ^b	0.10	0.77			
2	CHEM	8.59±0.08 ^{ab}	0.02	0.18	10.91±0.03 ^a	0.01	0.07	12.50±0.19 ^a	0.03	0.41			
3	MIC300	9.07±0.23 ^a	0.06	0.50	10.99±0.04 ^a	0.01	0.10	11.93±0.00 ^a	0.00	0.00			
4	MIC500	8.08±0.09 ^b	0.02	0.17	11.05±0.07 ^a	0.01	0.12	11.96±0.02 ^a	0.00	0.03			

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 48 ข้อมูลปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ : ปลูกขาว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)											
		Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	P-T	8.65±0.23 ^c	0.06	0.52	7.39±0.21 ^d	0.06	0.41	6.57±0.15 ^d	0.05	0.33			
2	CHEM	8.46±0.16 ^c	0.04	0.35	8.52±0.27 ^c	0.06	0.54	9.92±0.04 ^c	0.01	0.07			
3	MIC300	9.39±0.29 ^b	0.06	0.59	9.44±0.28 ^b	0.05	0.49	10.82±0.14 ^b	0.03	0.32			
4	MIC500	11.34±0.00 ^a	0.00	0.00	10.95±0.03 ^a	0.00	0.05	11.98±0.00 ^a	0.00	0.01			

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 49 ข้อมูลปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ : ไม่ปลูกข้าว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)								
		Vegetative Phase		Reproductive Phase		Ripening Phase				
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	P-T	37.75±0.34 ^b	0.02	0.58	37.65±0.30 ^b	0.02	0.60	37.79±0.19 ^b	0.01	0.42
2	CHEM	37.76±0.13 ^b	0.01	0.28	40.88±0.28 ^c	0.02	0.62	46.95±0.21 ^a	0.01	0.46
3	MIC300	39.43±0.25 ^a	0.01	0.55	43.44±0.16 ^a	0.01	0.35	46.54±0.19 ^a	0.01	0.43
4	MIC500	39.39±0.21 ^a	0.01	0.46	42.63±0.17 ^b	0.01	0.38	46.66±0.19 ^a	0.01	0.43

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 50 ข้อมูลปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ : ปลูกข้าว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)								
		Vegetative Phase		Reproductive Phase		Ripening Phase				
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	P-T	37.84±0.14 ^{cb}	0.01	0.32	32.54±0.21 ^d	0.01	0.47	30.58±0.17 ^c	0.01	0.38
2	CHEM	38.80±0.57 ^a	0.03	1.27	45.45±0.43 ^a	0.02	0.97	41.37±0.59 ^a	0.03	1.32
3	MIC300	37.41±0.13 ^b	0.01	0.29	38.42±0.22 ^c	0.01	0.49	37.59±0.17 ^b	0.01	0.37
4	MIC500	37.39±0.24 ^b	0.01	0.53	40.78±0.17 ^b	0.01	0.38	40.81±0.34 ^a	0.02	0.76

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 51 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในรากข้าว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)		
		\bar{x}	C.V	S.D.
1	P-T	3.93±0.57 ^b	0.33	1.28
2	CHEM	5.86±0.14 ^a	0.05	0.31
3	MIC300	3.51±0.07 ^{bc}	0.04	0.13
4	MIC500	2.90±0.03 ^c	0.02	0.07

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี

Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 52 ข้อมูลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)		
		\bar{x}	C.V	S.D.
1	P-T	4.73±0.98 ^b	0.21	0.69
2	CHEM	6.32±0.53 ^a	0.08	0.26
3	MIC300	3.21±0.07 ^c	0.02	0.05
4	MIC500	2.64±0.06 ^d	0.02	0.03

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี

Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 53 ขอบุผลปริมาณการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)											
		Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	P-T	0.12±0.00 ^a	0.10	0.01	0.53±0.01 ^b	0.07	0.02	0.44±0.01 ^b	0.07	0.02	0.44±0.01 ^b	0.07	0.02
2	CHEM	0.12±0.00 ^a	0.05	0.01	0.42±0.03 ^a	0.15	0.06	0.54±0.03 ^a	0.15	0.06	0.54±0.03 ^a	0.12	0.06
3	MIC300	0.07±0.00 ^b	0.12	0.01	0.29±0.00 ^b	0.02	0.01	0.36±0.01 ^c	0.02	0.01	0.36±0.01 ^c	0.03	0.01
4	MIC500	0.06±0.00 ^b	0.08	0.01	0.15±0.00 ^c	0.05	0.01	0.22±0.01 ^d	0.05	0.01	0.22±0.01 ^d	0.04	0.01

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 54 ขอบุผลความสูงของต้นข้าว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)											
		Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	P-T	60.40±2.60 ^b	0.06	3.68	186.00±0.58 ^b	0.01	1.00	198.50±3.50 ^a	0.01	1.00	198.50±3.50 ^a	0.02	4.95
2	CHEM	62.85±4.03 ^b	0.13	8.06	197.00±0.00 ^a	0.00	0.00	208.67±7.45 ^{ab}	0.00	0.00	208.67±7.45 ^{ab}	0.06	12.90
3	MIC300	76.94±3.68 ^a	0.11	8.24	186.00±0.00 ^b	0.00	0.00	192.33±0.33 ^c	0.00	0.00	192.33±0.33 ^c	0.00	0.58
4	MIC500	77.10±2.14 ^c	0.06	4.79	183.50±0.50 ^c	0.00	0.71	197.50±0.29 ^{ab}	0.00	0.71	197.50±0.29 ^{ab}	0.00	0.58

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 55 ข้อมูลจำนวนต้น

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)											
		Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	P-T	1.00±0.00 ^{ns}	0.00	0.00	3.00±0.32 ^{ns}	0.24	0.71	5.80±0.37 ^a	0.14	0.84	1.00±0.00 ^{ns}	0.00	0.00
2	CHEM	1.00±0.00 ^{ns}	0.00	0.00	2.60±0.24 ^{ns}	0.21	0.55	4.60±0.51 ^{ab}	0.25	1.14	1.00±0.00 ^{ns}	0.00	0.00
3	MIC300	1.00±0.00 ^{ns}	0.00	0.00	2.40±0.24 ^{ns}	0.23	0.55	4.40±0.51 ^{ab}	0.26	1.14	1.00±0.00 ^{ns}	0.00	0.00
4	MIC500	1.00±0.00 ^{ns}	0.00	0.00	2.80±0.20 ^{ns}	0.16	0.45	3.80±0.58 ^b	0.34	1.30	1.00±0.00 ^{ns}	0.00	0.00

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 56 ข้อมูลน้ำหนักรากขาว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)											
		Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	P-T	4.22±0.57 ^{ns}	0.27	1.15	17.04±0.32 ^{ns}	0.04	0.64	17.18±0.28 ^d	0.03	0.56	4.22±0.57 ^{ns}	0.27	1.15
2	CHEM	4.48±0.92 ^{ns}	0.41	2.05	24.33±1.71 ^{ns}	0.14	3.42	25.31±1.27 ^b	0.10	2.53	4.48±0.92 ^{ns}	0.41	2.05
3	MIC300	4.21±0.15 ^{ns}	0.06	0.26	18.17±0.15 ^{ns}	0.01	0.21	21.32±0.96 ^c	0.09	1.92	4.21±0.15 ^{ns}	0.06	0.26
4	MIC500	4.09±0.07 ^{ns}	0.04	0.15	18.90±0.28 ^{ns}	0.03	0.49	28.54±0.19 ^a	0.01	0.38	4.09±0.07 ^{ns}	0.04	0.15

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 57 ข้อมูลน้ำหนักต้นข้าว

No.	Treatment	Cadmium (mg/kg)											
		Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.
1	P-T	20.15±1.89 ^{ns}	0.42	3.28	44.80±0.95 ^b	0.03	1.34	51.04± 3.50 ^{ab}	0.10	4.95	51.04± 3.50 ^{ab}	0.10	4.95
2	CHEM	22.65±2.99 ^{ns}	0.26	5.97	49.47±0.00 ^a	0.00	0.00	56.72± 2.44 ^a	0.10	5.46	56.72± 2.44 ^a	0.10	5.46
3	MIC300	18.65±0.44 ^{ns}	0.05	0.88	46.45±0.00 ^b	0.00	0.00	51.67± 0.62 ^{ab}	0.03	1.38	51.67± 0.62 ^{ab}	0.03	1.38
4	MIC500	19.11±0.06 ^{ns}	0.01	0.13	42.70±0.00 ^c	0.00	0.00	49.35± 0.18 ^a	0.01	0.39	49.35± 0.18 ^a	0.01	0.39

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 58 ข้อมูลดัชนีการเก็บเกี่ยว (Harvest index: HI)

No.	Treatment	Harvest index: HI	
		\bar{x}	C.V
1	P-T	0.29±0.03 ^b	0.23
2	CHEM	0.48±0.05 ^a	1.06
3	MIC300	0.44±0.03 ^a	0.97
4	MIC500	0.52±0.03 ^a	0.98

ตาราง 59 ข้อมูลผลผลิตของข้าว

No.	Treatment	Vegetative Phase				Reproductive Phase				Ripening Phase			
		\bar{x}	C.V.	S.D.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	S.D.	\bar{x}	C.V.	S.D.	S.D.
1	P-T	386.80±43.72 ^a	0.25	97.75	35.25±0.48 ^a	0.03	0.96	0.96	9.10±1.14 ^b	0.28	2.55	2.55	
2	CHEM	278.60±25.45 ^b	0.96	56.90	19.33±4.91 ^b	1.00	8.50	8.50	13.32±0.92 ^a	1.04	2.05	2.05	
3	MIC300	160.00±23.18 ^c	0.90	51.83	14.00±1.08 ^b	1.08	2.16	2.16	11.44±0.88 ^{ab}	0.97	1.96	1.96	
4	MIC500	155.60±13.03 ^d	0.99	29.14	15.00±1.14 ^b	1.00	2.55	2.55	12.86±0.84 ^a	0.99	1.87	1.87	

หมายเหตุ: * ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์ แสดงความแตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan' multiple range ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

** ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Mean±SE)

ตาราง 60 ความสัมพันธ์การทดสอบของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนสังเคราะห์

ปริมาณ Cd ในดิน	ปริมาณ Cd ในราก	ปริมาณ Cd ในต้น	ปริมาณ Cd ในเมล็ด ข้าว	ปริมาณ Cd เปลือกข้าว	ปริมาณ Cd ในเมล็ด ข้าวขาว	ปริมาณ Cd ในเมล็ด ข้าวขาว	ความสูง ต้นข้าว	จำนวน ต้นข้าว	น้ำหนัก รากข้าว	น้ำหนัก ต้นข้าว	น้ำหนัก เมล็ด ข้าว	ดัชนีการ เก็บเกี่ยว	น้ำหนัก เมล็ด ข้าว	จำนวน เมล็ด	จำนวนเมล็ด ไม่สมบูรณ์
ปริมาณ Cd ในดิน	0.95**	0.56*	0.54*	0.59**	-0.42	-0.21	-0.21	0.75**	-0.61**	-0.72**	0.22	0.39	-0.02	-0.02	0.64**
ปริมาณ Cd ในราก	1.00	0.61**	0.60**	0.63**	-0.36	-0.18	-0.18	0.72**	-0.66**	-0.68**	0.27	0.39	0.02	0.02	0.69**
ปริมาณ Cd ในต้น		1.00	0.93**	0.90**	-0.09	-0.63**	-0.63**	0.60**	-0.89**	-0.46*	0.69**	0.64**	0.49*	0.49*	0.92**
ปริมาณ Cd ในเมล็ด			1.00	0.96**	0.00	-0.62**	-0.62**	0.59**	-0.95**	-0.38	0.68**	0.58**	0.45	0.45	0.95**
ปริมาณ Cd ในเมล็ด ข้าว															

ตาราง 60 (ต่อ)

ปริมาณ Cdในดิน	ปริมาณ Cdใน ราก	ปริมาณ Cd ในต้น ข้าว	ปริมาณ Cd ในเมล็ด ข้าว	ปริมาณCd เปลือกข้าว	ปริมาณCd ในเมล็ด ข้าว	ความสูง ต้นข้าว	จำนวน ต้นข้าว	น้ำหนัก รากข้าว	น้ำหนัก ต้นข้าว	น้ำหนัก ต้นข้าว	น้ำหนัก เมล็ด ข้าว	น้ำหนัก เมล็ด ข้าว	จำนวนเมล็ด ไม่สมบูรณ์
ปริมาณCdเปลือก ข้าว	1.00	0.02	-0.54**	0.57**	-0.88**	-0.37	0.47*	0.61**	0.29	0.90**			
ปริมาณCdใน เมล็ดข้าว	1.00	-0.01	0.15	0.12	-0.16	-0.33	-0.39	-0.24					
ความสูงต้นข้าว	1.00	1.00	0.69**	0.15	-0.35	-0.59**	-0.34	-0.63**					
จำนวนต้นข้าว	1.00	1.00	-0.70**	-0.59**	0.57**	0.36	0.34	0.67**					
น้ำหนักรากข้าว	1.00	1.00	1.00	0.43	-0.62**	-0.48**	-0.95**						
น้ำหนักต้นข้าว	1.00	1.00	1.00	1.00	-0.54*	0.02	-0.44						
ดัชนีการเก็บ เกี่ยว	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.47*	0.61**	0.67**					
น้ำหนักเมล็ดข้าว	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.80**	0.75**					
จำนวนเมล็ด	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.57**	1.00				
จำนวนเมล็ดไม่ สมบูรณ์	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00				1.00

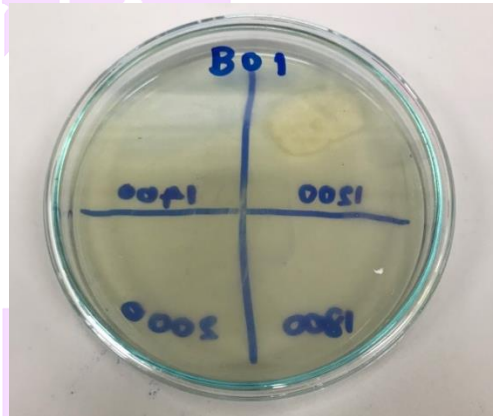
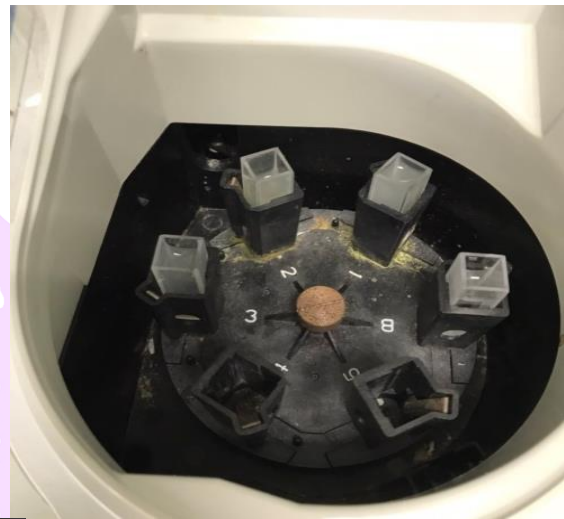
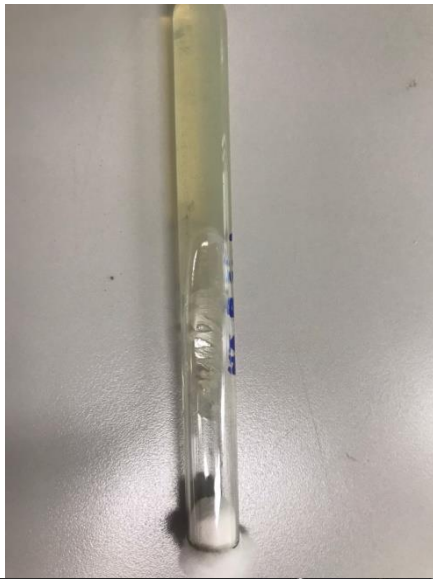
ตาราง 61 ความสัมพันธ์การหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียมในดินปนเปื้อนแมงตา

	ปริมาณ Cd ในดิน	OM	N	P	K	ปริมาณ Cd ในราก	ปริมาณ Cd ในดิน	ปริมาณ Cd ในเมล็ด	ปริมาณ Cd ในรากขาว	ปริมาณ Cd ในขาว	ความสูงต้นขาว	ความสูงต้นขาว	จำนวนต้นขาว	น้ำหนักรากขาว	น้ำหนักต้นขาว	น้ำหนัก	จำนวนเมล็ด	จำนวนสมบูรณ์
ปริมาณ Cd ในดิน	1	-0.52*	-0.15	-0.51*	-0.02	0.83**	0.95**	0.88**	0.89**	0.83**	0.71**	0.25	-0.21	0.62**	-0.23	0.05	0.70**	0.38
OM		1	0.69**	0.78**	0.56*	-0.14	-0.45*	-0.43	-0.60**	-0.37	-0.16	-0.34	0.55*	-0.23	0.69**	0.55*	-0.80**	-0.76**
N			1	0.91**	0.95**	0.13	-0.10	-0.22	-0.52*	-0.14	0.20	-0.49*	0.82**	0.13	0.96**	0.95**	-0.80**	-0.96**
P				1	0.85**	-0.26	-0.43	-0.57**	-0.76**	-0.49*	-0.05	-0.58**	0.83**	-0.17	0.94**	0.82**	-0.95**	-0.98**
K					1	0.18	0.00	-0.19	-0.39	-0.14	0.34	-0.58**	0.85**	0.22	0.96**	0.98**	-0.69**	-0.92**
ปริมาณ Cd ในเมล็ด						1	0.76**	0.79**	0.65**	0.79**	0.59**	0.27	-0.06	0.73**	-0.01	0.25	0.40	0.10
ราก							1	0.90**	0.83**	0.86**	0.63**	0.24	-0.20	0.43	-0.19	0.09	0.62**	0.31
ปริมาณ Cd ในต้น								1	0.82**	0.99**	0.42	0.42	-0.45*	0.48**	-0.37	-0.12	0.65**	0.43
ปริมาณ Cd ในเมล็ดราก									1	0.73**	0.55*	0.39	-0.48*	0.42	-0.55*	-0.31	0.89**	0.68**
ปริมาณ Cd ในขาว										1	0.37	0.41	-0.41	0.47*	-0.31	-0.07	0.56**	0.34
ขาว											1	-0.13	0.11	0.66**	0.17	0.39	0.27	-0.03
ความสูงต้นขาว												1	-0.45*	0.01	-0.58**	-0.49*	0.55*	0.57**
จำนวนต้นขาว													1	-0.08	0.91**	0.86**	-0.67**	-0.82**
น้ำหนักรากขาว														1	0.01	0.20	0.25	0.03
น้ำหนักต้นขาว															1	0.96**	-0.82**	-0.97**
น้ำหนักเมล็ดขาว																1	0.63	-0.88**
จำนวนเมล็ดสมบูรณ์																	1	0.92**
จำนวนเต็มสมบูรณ์																		1

ภาคผนวก ง ประมวลผลการวิจัย

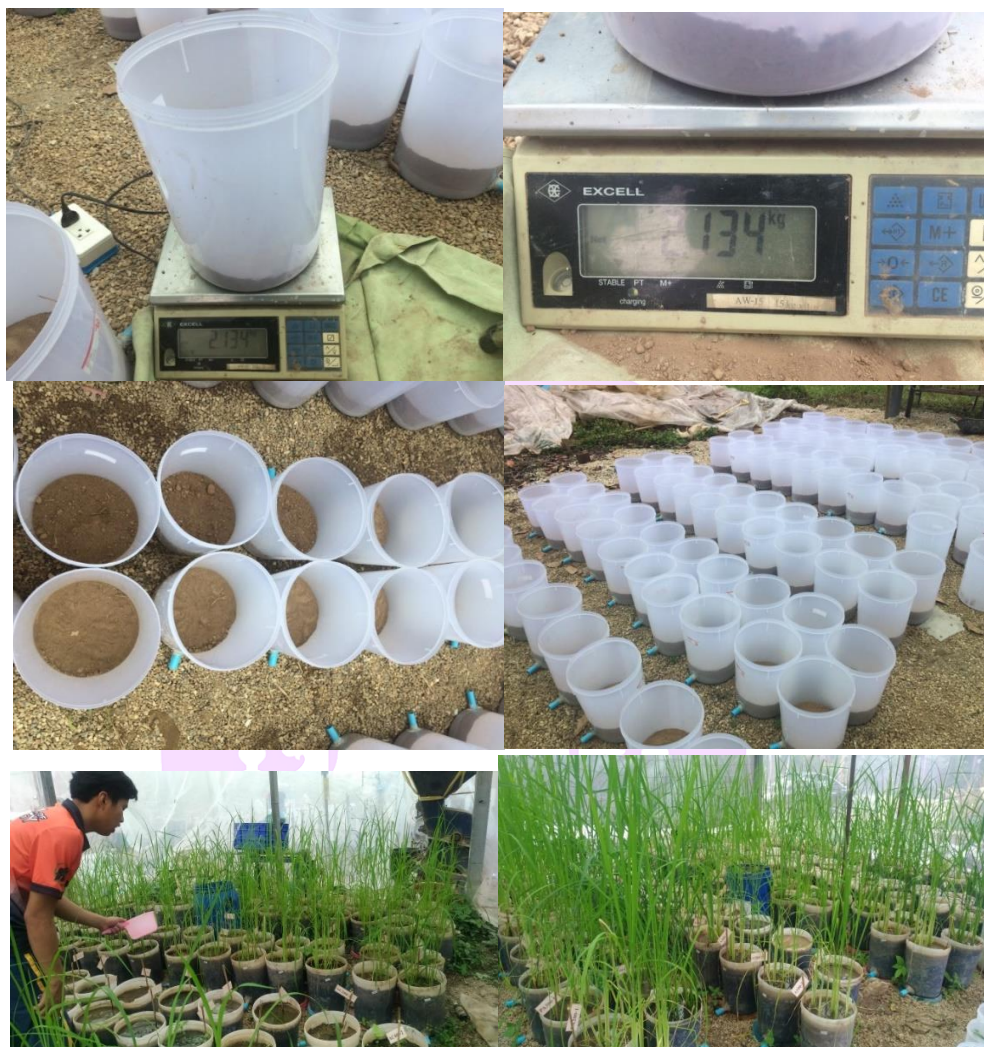


ภาพ 81 การทดสอบความทนของจุลินทรีย์ในสารชีวภัณฑ์ต่อความเข้มข้นของ
แคดเมียม



ภาพ 81 (ต่อ)





ภาพ 82 การหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียม
ในดินปนเปื้อนแม่ตา



ภาพ 82 (ต่อ)





ภาพ 83 การหาสัดส่วนของสารชีวภัณฑ์ที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณแคดเมียม
ในดินปนเปื้อนแม่ตา

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	วิมลรัตน์ ศีตีสาร
วัน เดือน ปี เกิด	11 ธันวาคม 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดลำปาง
วุฒิการศึกษา	2554 วท.ม. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา 2551 วท.บ. (ชีววิทยา), มหาวิทยาลัยนเรศวรพะเยา, พะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	111 ม. 10 ต.บ้านปิน อ.ดอกคำใต้ จ.พะเยา 56000
ผลงานตีพิมพ์	วิมลรัตน์ ศีตีสาร และสุชทัย พงศ์พัฒนศิริ. การศึกษาประสิทธิภาพของสารชีวภัณฑ์ในการลดการสะสมของแคดเมียมในนาข้าว. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 4(3), 1225-1236. มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี. วิมลรัตน์ ศีตีสาร และสุชทัย พงศ์พัฒนศิริ. การศึกษาการลดปริมาณแคดเมียมในดินสำหรับการปลูกข้าว. วารสารนเรศวรพะเยา 15(1), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา. (อยู่ระหว่างการตีพิมพ์)

