

ผลของรูปแบบการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกข้าวต่อการสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF WATER MANAGEMENT DURING RICE CULTIVATION ON CADMIUM AND
ARSENIC ACCUMULATION IN RICE GRAINS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science
Inter-Department of Environmental Science
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ผลของรูปแบบการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกข้าวต่อ การสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว |
| โดย | นายมนตรี ผลสินธ์ |
| สาขาวิชา | วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญรติ จันทร์ภิวฒน์ |

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

| | |
|--|---------------------------------|
| | คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย |
| (รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนุญ หนูจักร) | |
| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | |
| | ประธานกรรมการ |
| (ศาสตราจารย์ ดร.อรรถัย ขวาลภาฤทธิ์) | |
| | อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญรติ จันทร์ภิวฒน์) | |
| | กรรมการ |
| (รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข) | |
| | กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย |
| (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญศิริ เอกจิตต์) | |

มนตรี ผลสินธ์ : ผลของรูปแบบการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกข้าวต่อการสะสม
แคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว. (EFFECTS OF WATER MANAGEMENT DURING
RICE CULTIVATION ON CADMIUM AND ARSENIC ACCUMULATION IN RICE
GRAINS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.เพ็ญรติ จันทร์ภักดิ์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลของรูปแบบการจัดการน้ำระหว่างการ
เพาะปลูกข้าวต่อการเจริญเติบโตทางลำต้นของข้าว ปริมาณผลผลิตข้าว การสะสมแคดเมียมและ
สารหนูทั้งหมดในเมล็ดข้าว และการเปลี่ยนแปลงปัจจัยแวดล้อมระหว่างการเพาะปลูกข้าว รวมไปถึง
ถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีบางประการของดินก่อนและหลังการเพาะปลูกข้าว ผล
การศึกษาพบความเข้มข้นของแคดเมียม และสารหนูในดินนาข้าว ในช่วง 1.10 ถึง 71.1 และ 23.3
ถึง 45.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ รูปแบบการจัดการน้ำที่ต่างกันไม่ทำให้การเจริญเติบโต
ทางลำต้นและปริมาณผลผลิตข้าวที่ปลูกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ปริมาณ
อินทรีย์วัตถุในดินมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับผลผลิตข้าว โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)
เท่ากับ 0.833 และ 0.832 สำหรับการเพาะปลูกแบบ Conventional และ Treatment
ตามลำดับ เมล็ดข้าวที่เพาะปลูกแบบเปียกสลับแห้งมีการสะสมแคดเมียมสูงกว่าการเพาะปลูกแบบ
ดั้งเดิม ประมาณ 1.6 ถึง 1.9 เท่า และเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกแบบ Conventional มีการสะสมสาร
หนูมากกว่าการเพาะปลูกแบบ Treatment ประมาณ 1 ถึง 1.1 เท่า การสะสมแคดเมียมและสาร
หนูในเมล็ดข้าวนั้นพบว่าขึ้นอยู่กับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดิน ($R^2=0.883$
สำหรับแคดเมียม และ $R^2=0.952$ สำหรับสารหนู) และความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่อยู่
ในสภาพพร้อมใช้ในดิน ($R^2=0.884$ สำหรับแคดเมียม และ $R^2=0.874$ สำหรับสารหนู) เป็นหลัก

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5987256020 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: Paddy soil / Mae Tao / Conventional flooded condition / Alternate wetting and drying condition / Bioavailability

Montree Ponsin : EFFECTS OF WATER MANAGEMENT DURING RICE CULTIVATION ON CADMIUM AND ARSENIC ACCUMULATION IN RICE GRAINS.

Advisor: Asst. Prof. PENRADEE CHANPIWAT, Ph.D.

The objectives of this study were to i) study the effects of different water management schemes during rice cultivation on the rice growth rate and yield, Cd and As accumulations in the rice grain, ii) the changes of environmental parameters during rice cultivation and iii) the changes of some chemical characteristics of soils before and after cultivation. Total concentration of Cd and As in soil were ranging from 1.10 to 71.1 mg kg⁻¹ and 23.3 to 45.5 mg kg⁻¹, respectively. Different water management schemes had no significant effects in the differences of rice growth rate and yield. Soil organic matter showed a strong positive significant relationship with rice yield ($R^2=0.833$ and 0.832 for conventional flooded and alternate wetting and drying condition, respectively). Rice grain cultivated under the alternate wetting and drying condition had approximately 1.6 to 1.9 times of total Cd higher than that of the rice cultivated under the conventional flooded condition. On the other hand, rice grain cultivated under the conventional flooded condition had approximately 1 to 1.1 times of total As than that of the rice cultivated under the alternate wetting and drying condition. Total concentration ($R^2=0.883$ for Cd and 0.952 for As) and bioavailable concentration ($R^2=0.884$ for Cd and 0.874 for As) in the soils significantly correlated with those elemental concentrations in the rice grain.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญรติ จันทร์ภักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และชี้แนะแนวทาง อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญศิริ เอกจิตต์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นที่มีส่วนสำคัญในการปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) สำหรับทุนอุดหนุนหน่วยปฏิบัติการวิจัย (Research Unit : RU) เรื่อง การจัดการพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักจากอุตสาหกรรมและการทำเหมือง โปรแกรมวิจัย (Research Program : RP) "การจัดการสารพิษในอุตสาหกรรมเหมืองแร่" และขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมไปถึง Environmental Analysis Centre และ International Environmental Research Institute แห่ง Gwangju Institute of Science and Technology (GIST) สาธารณรัฐเกาหลี ที่ได้อำนวยความสะดวกและให้การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์อันเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ขอกราบขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยและสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้มอบทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมหมาย และคุณแม่คำนึ่ง ผลสินธุ์ และสมาชิกในครอบครัวที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนทุนสำหรับการศึกษาในระดับมหาบัณฑิตในครั้งนี้

มนตรี ผลสินธุ์

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ค |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ง |
| กิตติกรรมประกาศ..... | จ |
| สารบัญ..... | ฉ |
| สารบัญภาพ | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 3 |
| 1.3 สมมติฐาน | 4 |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย..... | 4 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 6 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 7 |
| 2.1 ลักษณะทั่วไปของแคดเมียมและสารหนูในสิ่งแวดล้อม | 7 |
| 2.1.1 แคดเมียม (Cadmium: Cd)..... | 7 |
| 2.1.2 สารหนู (Arsenic: As)..... | 8 |
| 2.1.3 ค่าภูมิหลัง (Background) ของแคดเมียมและสารหนูในดิน | 9 |
| 2.2 การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าวและเมล็ดข้าว..... | 9 |
| 2.2.1 การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าว..... | 9 |
| 2.2.2 การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว..... | 12 |
| 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมแคดเมียมและสารหนูในข้าว | 15 |

| | |
|---|----|
| 2.3.1 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดิน (Oxidation-reduction Potential: Eh).. | 16 |
| 2.3.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)..... | 19 |
| 2.3.3 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity: CEC)..... | 21 |
| 2.3.4 อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter: OM)..... | 21 |
| 2.3.5 ความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในสภาพพร้อมใช้ (Bioavailable Cd and As Concentrations)..... | 22 |
| 2.4 การจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูก (Water Management)..... | 24 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย..... | 27 |
| 3.1 การเก็บตัวอย่างดิน | 27 |
| 3.2 การเตรียมตัวอย่างดิน | 29 |
| 3.3 การเพาะปลูกข้าวด้วยวิธีการจัดการน้ำรูปแบบต่าง ๆ | 29 |
| 3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน | 36 |
| 3.4.1 เนื้อดิน (Soil Texture) | 37 |
| 3.4.2 ความเป็นกรด-ด่างของดิน (Soil pH) และความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential: ORP) | 37 |
| 3.4.3 อินทรีย์วัตถุในดิน (Organic Matter: OM)..... | 37 |
| 3.4.4 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity: CEC)..... | 38 |
| 3.4.5 ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนู (Total Cadmium and Arsenic Concentration) | 39 |
| 3.4.6 ความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ (Bioavailable Cadmium and Arsenic Concentrations)..... | 40 |
| 3.5 การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว..... | 40 |
| 3.6 การควบคุมคุณภาพของการย่อยและตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในดินและเมล็ดข้าว..... | 41 |
| 3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ | 42 |

| | |
|--|-----|
| บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการทดลอง | 43 |
| 4.1 ผลการควบคุมคุณภาพของการย่อยและตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนู ในดินและเมล็ดข้าว..... | 43 |
| 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน..... | 44 |
| 4.3 ผลการตรวจวัดการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงปัจจัยแวดล้อมระหว่างการเพาะปลูกข้าว 50 | |
| 4.3.1 การเจริญเติบโตทางลำต้นของข้าว | 50 |
| 4.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าว.. | 52 |
| 4.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าว..... | 56 |
| 4.4 ผลของรูปแบบการจัดการน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของดินหลังการเพาะปลูก | 60 |
| 4.4.1 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินก่อนและหลังการเพาะปลูกข้าว | 60 |
| 4.4.2 ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดินก่อนและหลังการเพาะปลูกข้าว . | 61 |
| 4.4.3 ร้อยละความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในดินก่อนและหลัง การเพาะปลูกข้าว..... | 64 |
| 4.5 ผลผลิตข้าวและความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว..... | 66 |
| 4.5.1 คุณภาพของเมล็ดข้าวทางกายภาพและผลผลิตข้าว | 66 |
| 4.5.2 ปริมาณการสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว..... | 71 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 81 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 81 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 82 |
| บรรณานุกรม..... | 84 |
| ภาคผนวก..... | 86 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 112 |

สารบัญภาพ

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1 แผนผังแสดงขอบเขตการวิจัย..... | 6 |
| รูปที่ 2 แหล่งที่มาของการปนเปื้อนแคดเมียมในดินนาข้าวและเมล็ดข้าว | 13 |
| รูปที่ 3 แหล่งที่มาของการปนเปื้อนสารหนูในดินนาข้าวและเมล็ดข้าว | 14 |
| รูปที่ 4 การกระจายตัวและการสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว | 14 |
| รูปที่ 5 แผนภาพความสัมพันธ์ของ Eh และ pH ต่อรูปฟอร์มทางเคมีของแคดเมียม..... | 17 |
| รูปที่ 6 แผนภาพความสัมพันธ์ของ Eh และ pH ต่อรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนู..... | 18 |
| รูปที่ 7 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันและปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นในดินนาข้าวที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของดิน..... | 19 |
| รูปที่ 8 ตัวอย่างแสดงการจับตัวกันของโลหะหนักกับอินทรีย์วัตถุในดิน | 22 |
| รูปที่ 9 การสะสมแคดเมียมและสารหนูในระหว่างการเพาะปลูกข้าวแบบน้ำขัง (Continuously Flooded) และการเพาะปลูกข้าวแบบน้ำขังเป็นช่วง ๆ (Intermittently Flooded)..... | 26 |
| รูปที่ 10 แผนที่แสดงตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาในตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก | 28 |
| รูปที่ 11 แปลงทดลอง (ขนาด 0.49 ตารางเมตร) สำหรับการเพาะปลูกข้าว | 30 |
| รูปที่ 12 ระยะห่างในการปักดำกล้าข้าว ตามวิธีการเพาะปลูกข้าวของเกษตรกรในพื้นที่ตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก..... | 31 |
| รูปที่ 13 ระยะห่างของการเพาะปลูกข้าวในโรงเรือนแต่ละชุดการทดลอง..... | 31 |
| รูปที่ 14 การจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition) | 34 |
| รูปที่ 15 เครื่องสีข้าวอัตโนมัติ..... | 41 |
| รูปที่ 16 ร้อยละความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้เทียบกับความเข้มข้นทั้งหมด ของแคดเมียมในตัวอย่างดินนาข้าว | 49 |
| รูปที่ 17 ร้อยละความเข้มข้นของสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้เทียบกับความเข้มข้นทั้งหมด ของสารหนูในตัวอย่างดินนาข้าว | 49 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 18 ลักษณะความผิดปกติทางใบของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียมในระดับสูงในชุดการทดลอง (ก) Conventional และ (ข) Treatment และ (ค) ภาพขยายแสดงการม้วนงอที่ผิดปกติของใบข้าว | 51 |
| รูปที่ 19 การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าว ในพื้นที่ศึกษา A..... | 54 |
| รูปที่ 20 การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าว ในพื้นที่ศึกษา B..... | 55 |
| รูปที่ 21 การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าว ในพื้นที่ศึกษา C..... | 55 |
| รูปที่ 22 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างในดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่ศึกษา A | 58 |
| รูปที่ 23 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างในดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่ศึกษา B | 59 |
| รูปที่ 24 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างในดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่ศึกษา C | 59 |
| รูปที่ 25 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในตัวอย่างดินก่อนและหลังการเพาะปลูกข้าว | 60 |
| รูปที่ 26 ปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในดินก่อนและหลังการเพาะปลูกข้าว | 62 |
| รูปที่ 27 ปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในดินก่อนและหลังการเพาะปลูกข้าว | 63 |
| รูปที่ 28 ร้อยละความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้เทียบกับความเข้มข้น ทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในตัวอย่างดินนาข้าวหลังการเพาะปลูก | 65 |
| รูปที่ 29 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) เมล็ดข้าวเปลือกและ (ข) ข้าวขาว พันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ | 67 |
| รูปที่ 30 แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตข้าวจากการเพาะปลูกแบบ Conventional และ Treatment | 70 |
| รูปที่ 31 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณอินทรีย์วัตถุในตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าว กับ ปริมาณผลผลิตข้าว..... | 70 |
| รูปที่ 32 แผนภูมิปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าวจากการเพาะปลูก แบบ Conventional และ Treatment..... | 77 |
| รูปที่ 33 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินเพื่อกำหนด ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแวดล้อมระหว่างการการเพาะปลูกแบบ (ก) Conventional และ (ข) Treatment ต่อปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว..... | 79 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 1 ค่าภูมิหลังของแคดเมียมและสารหนู (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ในดินทั่วไปในธรรมชาติ..... | 9 |
| ตารางที่ 2 การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าวในประเทศต่าง ๆ | 10 |
| ตารางที่ 3 การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าวของประเทศต่าง ๆ | 15 |
| ตารางที่ 4 พิกัดภูมิศาสตร์และสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินนอกฤดูกาลเพาะปลูกข้าวของพื้นที่ศึกษา | 27 |
| ตารางที่ 5 รายละเอียดการเพาะปลูกข้าวในแต่ละชุดการทดลอง | 31 |
| ตารางที่ 6 รายละเอียดการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกข้าวแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Conventional)..... | 32 |
| ตารางที่ 7 รายละเอียดการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition) | 33 |
| ตารางที่ 8 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน | 36 |
| ตารางที่ 9 ค่าความแม่นยำและความเที่ยงตรงของเครื่องมือวิเคราะห์ | 43 |
| ตารางที่ 10 ค่าร้อยละคืนกลับ (Recovery Rate) ของวิธีการย่อยตัวอย่างดินและข้าว..... | 44 |
| ตารางที่ 11 คุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพและเคมีของดินนาข้าวในพื้นที่ตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก [ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n=3]..... | 48 |
| ตารางที่ 12 ความสูงของต้นข้าว (เซนติเมตร) ในระยะการเจริญเติบโตต่าง ๆ | 51 |
| ตารางที่ 13 คุณภาพทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกและข้าวขาว พันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 | 68 |
| ตารางที่ 14 ค่าความเข้มข้นโดยประมาณของสารหนูอนินทรีย์ในเมล็ดข้าว | 77 |
| ตารางที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นทั้งหมดและความเข้มข้นที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ของแคดเมียมและสารหนูในดินก่อนการเพาะปลูกข้าวกับปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าวที่ปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบดั้งเดิม (Conventional)..... | 78 |

ตารางที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นทั้งหมดและความเข้มข้นที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ของ
 แคลเซียมและสารหนูในดินก่อนการเพาะปลูกข้าวกับปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคลเซียมและ
 สารหนูในเมล็ดข้าวที่ปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment) 78

ตารางที่ 17 สัปดาห์ที่ทำการตรวจวัดค่า Eh และ pH ในระหว่างการเพาะปลูกข้าวทั้ง 2 รูปแบบ... 80



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียม (Cd) และสารหนู (As) ในพื้นที่เกษตรกรรมนับเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่นักวิจัยทั่วโลกให้ความสนใจอย่างต่อเนื่อง (Liu et al., 2017) เมื่อเกิดการปนเปื้อนในดิน ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูอาจมีค่าสูงถึง 2-10 เท่า จากระดับที่สามารถพบได้ทั่วไปในดิน (0.01-2.0 และ 0.1-55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับแคดเมียมและสารหนู ตามลำดับ) (Bowen, 1979) การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในสิ่งแวดล้อมเกิดได้จากทั้งกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น การผุพังของวัตถุดินกำเนิดดิน การระเบิดของภูเขาไฟ และจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น อุตสาหกรรมการทำเหมืองแร่และหลอมโลหะ อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล รวมไปถึงการใช้ปุ๋ยและยาฆ่าแมลงเพื่อการเกษตรกรรม เป็นต้น (Chibuike and Obiora, 2014; Nordstrom, 2002; Liu et al., 2005) ดังเช่น ผลการศึกษาการปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในดินเพื่อการเกษตรกรรมโดยรอบเหมืองแร่ในประเทศเทศจีน ที่พบความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในดินมีค่าสูงถึง 11.7 และ 35.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Xue et al., 2017) นอกจากนี้ Adriano (2001) ยังได้รายงานความเป็นไปได้ว่าดินในพื้นที่รอบเหมืองแร่ อาจมีการปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูได้ถึง 1,000 เท่า ของระดับที่สามารถพบได้ทั่วไปในดิน การปนเปื้อนของแคดเมียมและสารหนูในดินนั้นไม่เพียงก่อให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อการเกษตรกรรมเท่านั้น แต่ยังสามารถก่อให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักอันตรายดังกล่าวลงสู่ดิน แหล่งน้ำผิวดินและห่วงโซ่อาหารอีกด้วย (Simmons et al., 2005; Sriprachote et al., 2012; Wuana and Okieimen, 2011) เช่น การสะสมแคดเมียมในพืชอาหาร และการรับสัมผัสแคดเมียมผ่านการบริโภคข้าวที่ปนเปื้อนในประเทศญี่ปุ่นในช่วงศตวรรษที่ 20 จนส่งผลให้เกิดโรคอิตะ-อิตะ (Itai-itai) และการรับสัมผัสสารหนูผ่านการบริโภคน้ำบาดาลและข้าว ในประเทศกัมพูชา และบังคลาเทศ จนส่งผลให้เกิดโรคมะเร็งผิวหนัง และเกิดจุดสีดำบนฝ่ามือฝ่าเท้า เหล่านี้เป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความเป็นพิษของแคดเมียมและสารหนูต่อสุขภาพมนุษย์ (Chen et al., 2005; Raghunath et al., 1999)

ประเทศไทยมีภาคเกษตรกรรมเป็นหนึ่งในภาคส่วนการผลิตที่สำคัญต่อระบบเศรษฐกิจ และยังมีมีความสำคัญต่อการผลิตอาหารเพื่อการบริโภคของประชากรทั้งประเทศ (Sriprachote et al., 2012; Swaddiwudhipong et al., 2010; Zarcinas et al., 2004) โดยพบว่าร้อยละ 46.9 ของพื้นที่เกษตรกรรมในประเทศไทยนั้นเป็นพื้นที่นาข้าว (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2556) กรมพัฒนาที่ดิน (2558) ได้ทำการศึกษาระดับความเข้มข้นและการปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในดินเกษตรกรรมของประเทศไทย และพบว่าค่าเฉลี่ยของแคดเมียมและสารหนูในดินนั้นมีค่าเท่ากับ 1.7 และ 26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) พบว่าสารหนูในดินนั้นมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน (ต้องไม่เกิน 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ถึง 6.7 เท่า

ในส่วนของความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าวของพื้นที่เพาะปลูกข้าวที่สำคัญแหล่งหนึ่งของประเทศไทย คือ พื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก มีการศึกษาและรายงานการปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าวสูงถึง 284 และ 14.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย (ต้องไม่เกิน 37 และ 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับแคดเมียมและสารหนู ตามลำดับ) ถึง 7.3 และ 3.7 เท่า ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้จึงมีรายงานพบการปนเปื้อนแคดเมียมในเมล็ดข้าวสูงถึง 7.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่กำหนดโดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ และองค์การอนามัยโลก (FAO/WHO) (0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) (Simmons et al., 2005; สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2552) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณแคดเมียมในเลือดของประชากรในพื้นที่ที่บริโภคข้าวที่เพาะปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียม นั้น มีค่าสูงกว่ามาตรฐานแคดเมียมในเลือด (5 ไมโครกรัมต่อลิตรเลือด) ถึง 16.4 เท่า อีกทั้งยังพบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างปริมาณแคดเมียมในเลือดกับปริมาณการบริโภคข้าวที่เพาะปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนอีกด้วย (Akkajit, 2015; Simmons et al., 2005; Sriprachote et al., 2012) ด้วยเหตุนี้กรมควบคุมมลพิษจึงได้ส่งเสริมให้ประชาชนในพื้นที่ทำการปลูกพืชที่ไม่ใช่อาหาร เช่น อ้อย แทนการปลูกข้าวเพื่อลดการรับสัมผัสแคดเมียมของประชาชน หากแต่ประชาชนในพื้นที่ยังคงปลูกข้าวเพื่อการบริโภคในครัวเรือนอยู่จนถึงปัจจุบัน (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2559) อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันพบว่ายังคงไม่มีการรายงานการปนเปื้อนของสารหนูในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกได้จากพื้นที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก แต่อย่างใด

การสะสมแคดเมียมและสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของข้าวนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ในพื้นที่เพาะปลูกข้าวเป็นสำคัญ เช่น ระดับความเข้มข้นทั้งหมดและรูปฟอร์มทางเคมีของธาตุที่ปนเปื้อน ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดิน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่ารูปแบบการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกข้าวยังส่งผลต่อการสะสมแคดเมียมและสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของข้าวได้อีกด้วย ตัวอย่างเช่น Yue Sun et al. (2014) ศึกษาพบว่า การเพาะปลูกข้าวแบบให้น้ำขังตลอดระยะเวลาการเพาะปลูกนั้น มีผลทำให้การสะสมแคดเมียมในเมล็ดข้าวลดลงถึง 17.7 เท่า เมื่อเทียบกับการสะสมแคดเมียมในข้าวที่เพาะปลูกโดยวิธีการจัดการน้ำแบบประหยัดน้ำ ในทางตรงกันข้ามวิธีการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกข้าวดังกล่าว กลับส่งผลให้การสะสมของสารหนูในเมล็ดข้าวสูงขึ้นถึง 2.3 เท่า เมื่อเทียบกับการสะสมสารหนูในข้าวที่เพาะปลูกโดยวิธีการจัดการน้ำแบบประหยัดน้ำ

ด้วยเหตุปัจจัยดังกล่าวข้างต้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ในภาพรวมเพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของวิธีการจัดการน้ำแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติและวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งต่อ 1) การเจริญเติบโตของต้นข้าว ปริมาณผลผลิตข้าว 2) การสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว และ 3) การเปลี่ยนแปลงปัจจัยแวดล้อม (ความเป็นกรด-ด่าง และความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน) ระหว่างการเพาะปลูกข้าว และลักษณะทางเคมีบางประการของดินก่อนและหลังการเพาะปลูกข้าว

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการเจริญเติบโตทางลำต้นของข้าว ปริมาณผลผลิตข้าว และการสะสมแคดเมียมและสารหนูทั้งหมดในเมล็ดข้าวที่ปลูกด้วยวิธีน้ำขังตลอดระยะเวลาการเพาะปลูก (วิธีดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ) และวิธีการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง
- 2) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปัจจัยแวดล้อม (ความเป็นกรด-ด่าง และความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน) ระหว่างการเพาะปลูกข้าวด้วยวิธีน้ำขังตลอดระยะเวลาการเพาะปลูก (วิธีดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ) และวิธีการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง

- 3) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีบางประการ (อินทรีย์วัตถุ, ความเข้มข้นทั้งหมด และความเข้มข้นในสภาพพร้อมใช้) ของดินก่อนและหลังการเพาะปลูกข้าวด้วยวิธีการจัดการน้ำที่แตกต่างกัน

1.3 สมมติฐาน

- 1) การสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีขังน้ำตลอดเวลา (แบบดั้งเดิม) จะมีค่าสูงกว่าปริมาณการสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีแบบเปียกสลับแห้งอย่างมีนัยสำคัญ
- 2) การเพาะปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้งจะทำให้การเจริญเติบโตของข้าว และปริมาณผลผลิตข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีขังน้ำตลอดเวลา (แบบดั้งเดิม) และแบบเปียกสลับแห้งมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
- 3) ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในดินที่เพาะปลูกข้าวด้วยวิธีขังน้ำตลอดระยะเวลาการเพาะปลูก (วิธีดั้งเดิม) มีค่าน้อยกว่าการเพาะปลูกข้าวด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

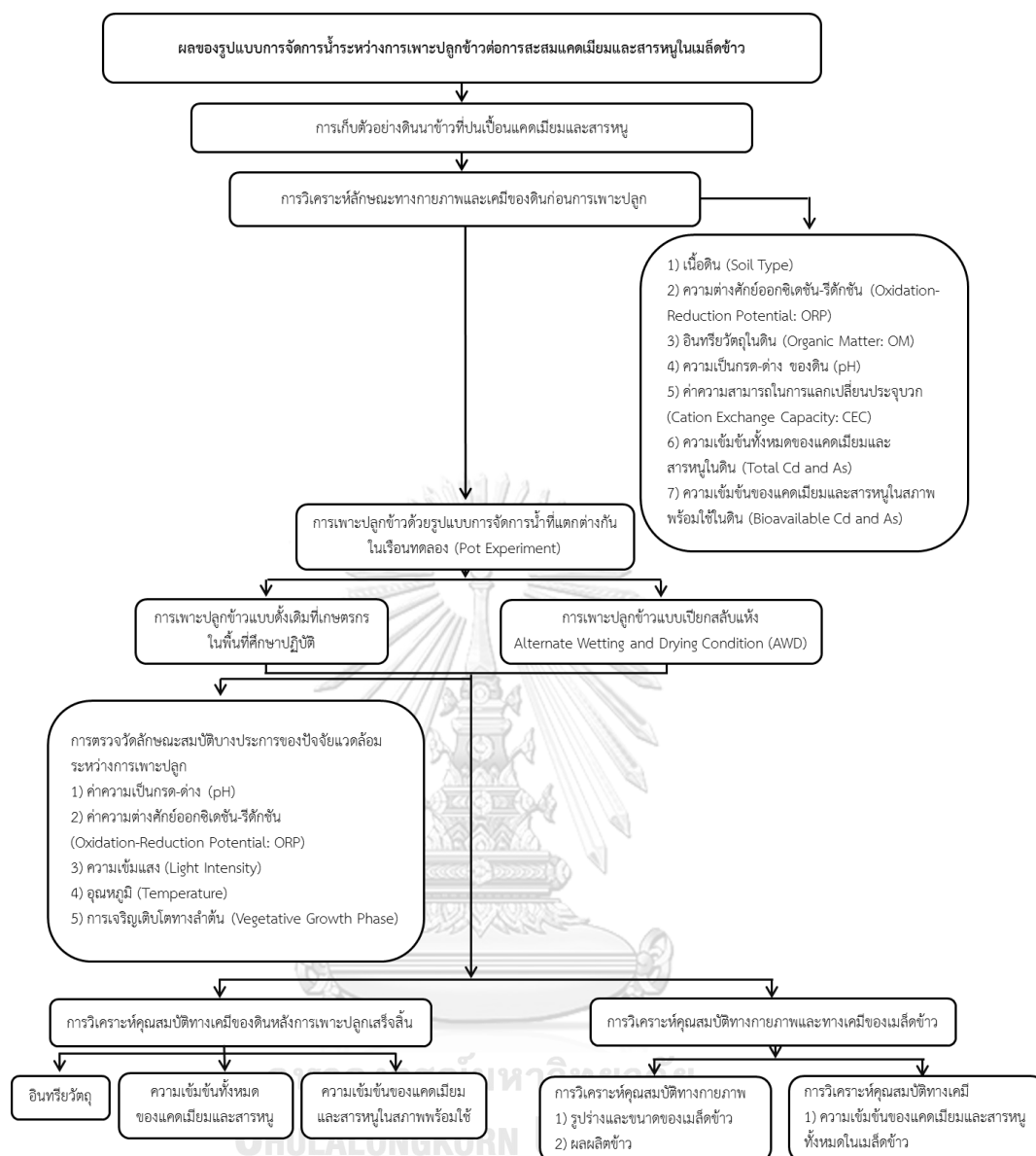
พื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้ คือ พื้นที่เพาะปลูกข้าวที่ปนเปื้อนแคดเมียม ในตำบลแม่ตาว อำเภอมะสอย จังหวัดตาก เมื่อดำเนินการเก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มแล้ว การดำเนินการศึกษาวิจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน (รูปที่ 1) มีรายละเอียดโดยสรุป ดังนี้

ส่วนที่ 1 การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพและทางเคมีของดินก่อนการเพาะปลูกข้าว ได้แก่ เนื้อดิน (Soil Type) ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-reduction Potential: ORP) ความเป็นกรด-ด่าง ของดิน (Soil pH) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (Cation Exchange Capacity: CEC) อินทรีย์วัตถุในดิน (Organic Matter: OM) ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดิน (Total Cadmium and Arsenic Concentrations) และความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในสภาพพร้อมใช้ในดิน (Bioavailable Cadmium and Arsenic Concentrations)

ส่วนที่ 2 คือ การศึกษาผลของรูปแบบการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกข้าวในเรือนทดลอง (Pot Experiment) 2 วิธี คือ 1) การเพาะปลูกข้าวแบบขังน้ำตลอดเวลา (แบบดั้งเดิมในพื้นที่ศึกษา) และ 2) การเพาะปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition) โดยในระหว่างการเพาะปลูกจะได้ดำเนินการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงปัจจัยแวดล้อม ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในดิน ความชื้นแสง อุณหภูมิ การเจริญเติบโตทางลำต้นของข้าว

ส่วนที่ 3 คือ การศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีบางประการของดิน (อินทรีย์วัตถุในดิน ความชื้นชั้นทั้งหมดและความชื้นชั้นในสภาพพร้อมใช้) ภายหลังจากการเพาะปลูกข้าวแล้วเสร็จและการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของเมล็ดข้าว (รูปร่างและขนาดของเมล็ดข้าว ปริมาณผลผลิตข้าว ปริมาณความชื้นชั้นทั้งหมดของแคะเมี่ยมและสารหนูที่สะสมในเมล็ดข้าว)





รูปที่ 1 แผนผังแสดงขอบเขตการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ข้อมูลเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตข้าวและการสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกข้าวแบบดั้งเดิมในพื้นที่ศึกษาและแบบเปียกสลับแห้งที่สามารถเป็นแนวทางสู่การปรับเปลี่ยนรูปแบบการเพาะปลูกข้าวที่สามารถลดการสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าวได้

2) แนวทางการประยุกต์ใช้ผลการศึกษาในพื้นที่เกษตรกรรมที่ปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในพื้นที่อื่น ๆ ของประเทศไทย

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การรวบรวมและทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบไปด้วย 1) ลักษณะทั่วไปของ แคดเมียมและสารหนูในสิ่งแวดล้อม 2) การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าวและเมล็ดข้าว 3) ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมแคดเมียมและสารหนูในข้าว และ 4) การจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูก (Water Management) มีรายละเอียดดังนี้

2.1 ลักษณะทั่วไปของแคดเมียมและสารหนูในสิ่งแวดล้อม

แคดเมียม (Cd) และสารหนู (As) เป็นธาตุโลหะและกึ่งโลหะ ตามลำดับ ที่มีความเป็นพิษสูง เป็นธาตุที่ไม่จำเป็นและไม่มีความจำเป็นต่อมนุษย์ พืช และสัตว์ ถูกจัดอยู่ในกลุ่ม สารก่อมลพิษ สารอันตราย และเป็นสารก่อมะเร็งกลุ่มที่ 1 โดยองค์การระหว่างประเทศเพื่อการวิจัย มะเร็ง (Duan et al., 2017) แคดเมียมและสารหนูเป็นธาตุที่พบได้โดยทั่วไปในสิ่งแวดล้อม เช่น เปลือกโลก หิน ตะกอนดิน และดิน (Greenwood and Earnshaw, 2012; Kabata and Pendias, 1985) การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในสิ่งแวดล้อมเกิดได้จากทั้งกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น การฟุ้งของวัตถุต้นกำเนิดดิน การระเบิดของภูเขาไฟ และจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น อุตสาหกรรมการทำเหมืองแร่และหลอมโลหะ อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล รวมไปถึง การใช้ปุ๋ยและยาฆ่าแมลงเพื่อการเกษตรกรรม เป็นต้น (Chibuike and Obiora, 2014; Nordstrom, 2002; Liu et al., 2005) การปนเปื้อนของแคดเมียมและสารหนูในดินไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อการเกษตรกรรมเท่านั้น แต่ยังอาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนของ โลหะหนักอันตรายดังกล่าวลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน แหล่งน้ำผิวดิน และห่วงโซ่อาหารได้อีกด้วย

2.1.1 แคดเมียม (Cadmium: Cd)

แคดเมียมเป็นธาตุในกลุ่ม 2B คาบที่ 5 ของตารางธาตุ มีคุณสมบัติเบา อ่อน ดัดงอได้ง่าย มี น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 112.4 มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 320.9 องศาเซลเซียส และจุดเดือดเท่ากับ 767 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 8.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Wuana and Okieimen, 2011) แคดเมียมเป็นธาตุที่พบได้โดยทั่วไปในธรรมชาติที่ความเข้มข้นประมาณ 0.01-2.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยมักกระจายปนกับแร่ชนิดอื่น ไม่ได้เป็นแร่ที่แยกเป็นเอกเทศ มักพบปนอยู่กับแร่สังกะสีใน

ปริมาณร้อยละ 0.1-5 ทั้งนี้ปริมาณแคดเมียมจะมีสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับปริมาณของแร่สังกะสี กล่าวคือ หากในแร่มีปริมาณสังกะสีสูงปริมาณของแคดเมียมก็มักจะมีปริมาณสูงด้วย (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) แคดเมียมถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตเม็ดสี และอุตสาหกรรมผลิตฉนวนกันความร้อนในวัสดุอัลลอยด์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Di Toppi and Gabrielli, 1999) อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมผลิตหลอดฟลูออเรสเซนต์สำหรับกล้องถ่ายรูป และยังถูกใช้เป็นส่วนเพิ่มความคงตัวของพลาสติกอีกด้วย (Adriano, 2001) การรับสัมผัสแคดเมียมแบบเฉียบพลันอาจก่อให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง และท้องเสียอย่างรุนแรง ในกรณีที่ได้รับสัมผัสในระยะเวลานานอาจทำให้เกิดโรคโลหิตจาง ความดันโลหิตสูง มะเร็ง ภาวะหัวใจล้มเหลว โรคหลอดเลือดในสมองอุดตัน ถุงลมโป่งพอง ปอดเสียหายรุนแรง ไตผิดปกติ ต้อกระจก และโรคกระดูกพรุนได้ (Prasad et al., 2015)

2.1.2 สารหนู (Arsenic: As)

สารหนูเป็นธาตุกึ่งโลหะในกลุ่มที่ 15 คาบที่ 4 ของตารางธาตุ มีลักษณะเป็นของแข็งสีเหลือง สีดํา และสีเทา มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 74.92 มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 817 องศาเซลเซียส และจุดเดือดเท่ากับ 887 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 5.73 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Wuana and Okieimen, 2011) สารหนูเป็นธาตุที่พบได้โดยทั่วไปในธรรมชาติที่ความเข้มข้นประมาณ 0.1-55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Adriano, 2001) โดยส่วนใหญ่สารหนูจะถูพบในรูปของสารประกอบสารหนูอินทรีย์ และสารหนูอนินทรีย์ และมักถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านเกษตรกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนผสมของสารกำจัดศัตรูพืช กำจัดวัชพืชและสารฆ่าเชื้อรา และใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเคมีภัณฑ์ เช่น เซรามิคและแก้ว (Adriano, 2001) การรับสัมผัสสารหนูแบบเฉียบพลันอาจทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องเสีย หากได้รับสัมผัสในระยะเวลานานอาจทำให้เกิดจุดดำบนฝ่ามือฝ่าเท้า รวมไปถึงอาจส่งผลต่อระบบประสาท ความเสียหายของหลอดเลือด และอาจก่อให้เกิดโรคมะเร็งผิวหนัง มะเร็งปอด และมะเร็งตับได้ (Chen et al., 1986; Smith et al., 2000) ความเป็นพิษของสารหนูมักขึ้นอยู่กับรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนู โดยความเป็นพิษของรูปฟอร์มของสารหนูจะลดลง ตามลำดับ ดังนี้ Arsenite (As(III)) > Methyl arsine oxide (MAs(III)O) > Dimethylarsinous acid with glutathione (DMA (III)GS) > Dimethylarsinic acid (DMAs(V)) > Methylarsonic acid (MAs(V)) > Arsenate (As(V)) (Vega et al., 2001)

2.1.3 ค่าภูมิหลัง (Background) ของแคดเมียมและสารหนูในดิน

ความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนู ในดินทั่วไปในธรรมชาติทั่วโลก ประเทศสหรัฐอเมริกา และประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 1 โดยพบว่าค่าภูมิหลังของความเข้มข้นแคดเมียมและสารหนูในดินทั่วไปในธรรมชาติของโลก มีค่าอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 2.0 และ 0.1 ถึง 55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นแคดเมียมและสารหนูในดินทั่วไปในธรรมชาติของประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศไทย พบว่าความเข้มข้นของธาตุดังกล่าวมีค่าอยู่ในช่วงของค่าภูมิหลังของแคดเมียมและสารหนูในดินทั่วไปในธรรมชาติของโลก ซึ่งระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกันของแคดเมียมและสารหนูในแต่ละพื้นที่นั้นอาจขึ้นกับวัตถุดิบกำเนิดดิน สภาพภูมิอากาศ และสภาพภูมิประเทศของแต่ละพื้นที่ด้วย (Wuana and Okieimen, 2011)

ตารางที่ 1 ค่าภูมิหลังของแคดเมียมและสารหนู (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ในดินทั่วไปในธรรมชาติ

| ธาตุ | โลก ¹ | สหรัฐอเมริกา ² | ไทย ³ |
|----------|------------------|---------------------------|------------------|
| แคดเมียม | 0.01-2.0 | 0.50-1.7 | 1.7 |
| สารหนู | 0.1-55 | 0.6-11.0 | 26 |

ที่มา: ¹ Adriano (2001); ² Bradford et al. (1996); ³ สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2552)

2.2 การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าวและเมล็ดข้าว

2.2.1 การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าว

การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าวเป็นปัญหาที่สำคัญในหลายประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศในแถบเอเชียใต้และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Jo and Koh, 2004) โดยการปนเปื้อนของธาตุเหล่านี้มักเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น กิจกรรมการทำเหมืองแร่ (Xue et al., 2017) ผลการศึกษาการปนเปื้อนโลหะหนักในดินนาข้าวรอบเหมืองแร่ในประเทศจีน พบความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าวมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1.01 (ค่าเฉลี่ย 0.11) และ 0 ถึง 4.14 (ค่าเฉลี่ย 0.44) มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Herawati et al., 2000) ส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าวบริเวณโดยรอบเหมืองแร่ในประเทศจีนมีค่าสูงถึง 11.7 และ 35.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศจีน ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยทั่วโลกจึงได้ให้ความสนใจศึกษาปัญหาการปนเปื้อนของแคดเมียมและสารหนูใน

ดินนาข้าวเป็นอย่างมาก เนื่องจากการปนเปื้อนของแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าวนั้นไม่เพียงก่อให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะการใช้ประโยชน์ของดินเท่านั้น แต่ยังอาจก่อให้เกิดการสะสมของโลหะหนักอันตรายดังกล่าวในเมล็ดข้าวได้อีกด้วย (Wuana and Okieimen, 2011) การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าวของประเทศต่าง ๆ สรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าวในประเทศต่าง ๆ

| ประเทศ | ธาตุ | ความเข้มข้นเฉลี่ย (มก./กก.) | ช่วงความเข้มข้น (มก./กก.) | เอกสารอ้างอิง |
|--------------|----------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| อินโดนีเซีย | แคดเมียม | 73.7 | - | Herawati et al. (2000) |
| ไทย | แคดเมียม | - | 3.0 – 85.0 | Phaenark et al. (2009) |
| ฝรั่งเศส | สารหนู | 8.0 | 5.0 – 10.0 | Meharg et al. (2009) |
| สหรัฐอเมริกา | สารหนู | 6.0 | 4.0 – 7.0 | (2009) |
| สเปน | สารหนู | 8.0 | 4.0 – 11.0 | |
| จีน | แคดเมียม | 11.7 | - | Xue et al. (2017) |
| | สารหนู | 35.1 | - | |
| ญี่ปุ่น | แคดเมียม | 0.3 | 0.02 – 3.0 | Makino (2007) |
| | สารหนู | 11.0 | 0.4 – 70.0 | |
| บังคลาเทศ | แคดเมียม | 3.0 | 1.0 – 8.5 | Proshad et al. (2017) |
| | สารหนู | 12.1 | 2.5 – 25.4 | |

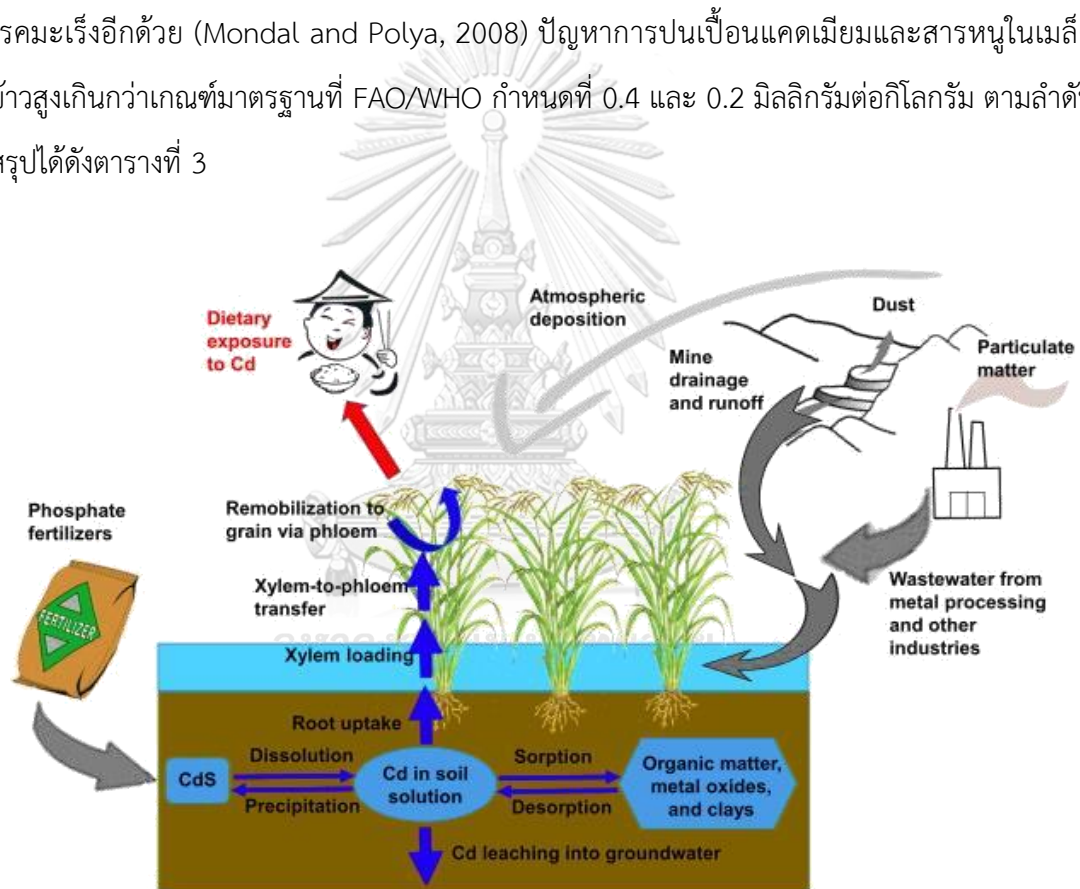
การปนเปื้อนแคดเมียมในดินนาข้าวในประเทศไทย มีรายงานพบการปนเปื้อนในพื้นที่รอบเหมืองแร่สังกะสี ในอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก (Simmons et al., 2005) โดยสถาบันการจัดการทรัพยากรน้ำนานาชาติ (International Water Management Institute : IWMI) ได้ทำการศึกษาความเข้มข้นของแคดเมียมในตัวอย่างดินนาข้าวที่รับน้ำจากร่องน้ำชลประทานที่ผันน้ำมาจากลำห้วยแม่ตาบ และพบความเข้มข้นของแคดเมียมในตัวอย่างดินนาข้าวมีค่าอยู่ในช่วง 3.4 ถึง 284 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย (ต้องไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ถึง 7.7 เท่า อีกทั้งยังมีค่าสูงเกินเกณฑ์อนุโลมสูงสุดที่ยอมให้มีได้ของประชาคมเศรษฐกิจยุโรป (The European Economic Community Maximum Permissible Level) ที่กำหนดไว้ที่ 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ถึง 1.1 ถึง 95 เท่า (Siriprachai, 1995; Simmons et al., 2005) นอกจากนี้ยังพบว่าแคดเมียมที่ปนเปื้อนในตะกอนดินจากลำห้วยแม่ตาบ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ดี หรืออยู่ในรูปที่พร้อมต่อการดูดซับของพืช (Bioavailable Form) จึงสรุปว่าพื้นที่นาข้าวที่รับน้ำจากห้วยแม่ตาบเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของแคดเมียมในข้าว (Khaokaew and Landrot, 2015)

ในส่วนการปนเปื้อนสารหนูในดินนาข้าวในประเทศไทย มีรายงานพบการปนเปื้อนในพื้นที่อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยกรมวิชาการเกษตร (2531) ได้ทำการศึกษาความเข้มข้นของสารหนูในตัวอย่างดินเพื่อการเกษตรกรรม พบว่าความเข้มข้นของสารหนูในตัวอย่างดินเพื่อการเกษตรกรรมมีค่าอยู่ในช่วง 1.4 ถึง 247 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย (ต้องไม่เกิน 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) พบว่าสารหนูมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ถึง 63.3 เท่า นอกจากนี้ยังมีรายงานพบการปนเปื้อนสารหนูในดินเพื่อการเกษตรกรรมในพื้นที่รอบเหมืองแร่ทองคำ อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย โดยพบความเข้มข้นของสารหนูในตัวอย่างดินเพื่อการเกษตรกรรมมีค่าอยู่ในช่วง 2.1 ถึง 94.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย พบว่าสารหนูในดินดังกล่าวมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ถึง 24.2 เท่า (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2555)

2.2.2 การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว

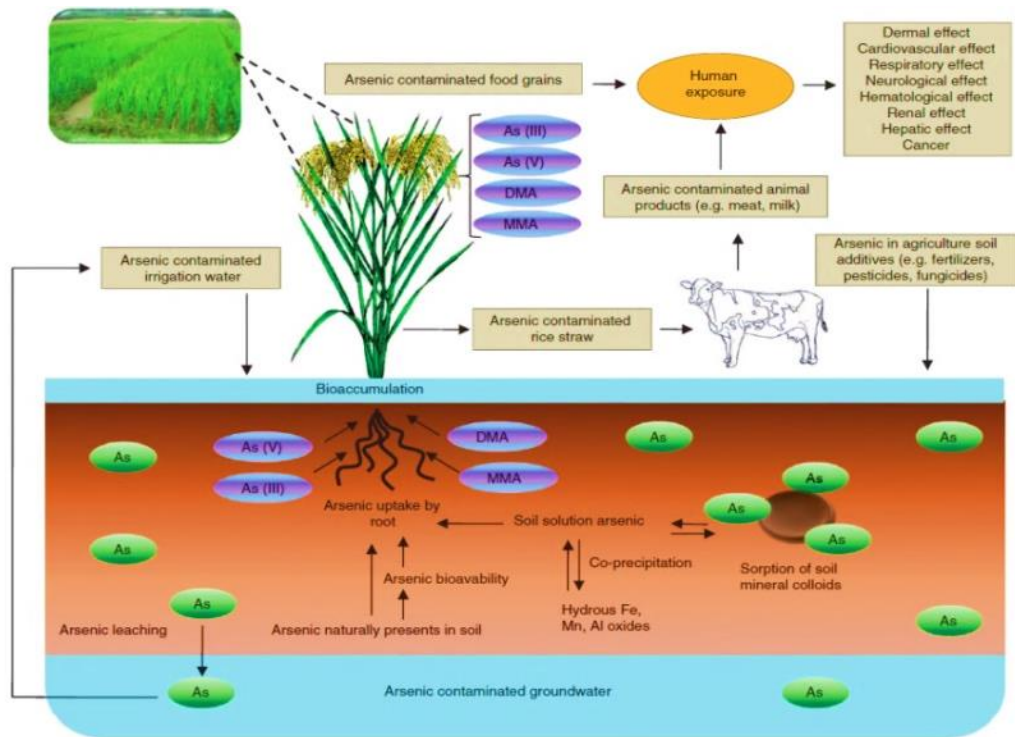
ข้าว (*Oryza sativa L.*) เป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของโลกและเป็นแหล่งพลังงานของมนุษย์ (Huang et al., 2013b) โดยในระหว่าง พ.ศ. 2555 ถึง พ.ศ. 2557 พบว่าการบริโภคข้าวเฉลี่ยของประชากรทั่วโลกมีค่าประมาณ 57.2 กิโลกรัมต่อคนต่อปี และมีการคาดการณ์ว่าในระหว่างปี พ.ศ. 2558 ถึง พ.ศ. 2567 ปริมาณการบริโภคข้าวเฉลี่ยต่อปีของประชากรทั่วโลกอาจมีค่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 0.2 ถึง 1.2 เท่า สำหรับประเทศไทย พบว่าในระหว่าง พ.ศ. 2555 ถึง พ.ศ. 2557 ปริมาณการบริโภคข้าวเฉลี่ยของประชากรไทยมีค่าสูงกว่าปริมาณการบริโภคข้าวของประชากรทั่วโลกประมาณ 2.5 เท่า และคาดการณ์ว่าใน พ.ศ. 2567 ปริมาณการบริโภคข้าวของคนไทยจะเพิ่มขึ้นเป็น 147.2 กิโลกรัมต่อคนต่อปี (CODEX, 2014) จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าการบริโภคข้าวของมนุษย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในหลายปีที่ผ่านมา และจะเพิ่มสูงขึ้นอีกในอนาคต ดังนั้นหากมีการปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในข้าวก็อาจทำให้มนุษย์ได้รับสัมผัสสารพิษดังกล่าวผ่านการบริโภคข้าวได้ ด้วยเหตุนี้คณะกรรมการโคเด็กซ์สาขาวัตถุเจือปนอาหาร (Codex Committee on Food Additives: CCFA) จึงได้กำหนดระดับสูงสุดที่อนุญาตให้มีได้ของแคดเมียมและสารหนูอนินทรีย์ในเมล็ดข้าว เท่ากับ 0.4 และ 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (CODEX, 2014) ทั้งนี้ Silva et al. (2005) รายงานว่าโดยส่วนใหญ่แล้วมนุษย์นั้นมักได้รับสัมผัสแคดเมียมและสารหนูผ่านการบริโภคอาหาร เช่น น้ำดื่ม พืชอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าว การบริโภคข้าวที่ปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูอนินทรีย์สูงเกินค่ามาตรฐานอาหารของ FAO/WHO (Codex Alimentarius Commission: CAC) ที่ระดับความเข้มข้น 0.4 และ 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ อาจก่อให้เกิดการสะสมแคดเมียมและสารหนูในร่างกายของมนุษย์ได้ถึง 0.49 และ 0.23 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมต่อวันสำหรับผู้ใหญ่ และ 0.34 และ 0.29 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมต่อวันสำหรับเด็ก (Huang et al., 2013a) และอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น โรคอิตา-อิตา (Itai-itai) มะเร็งผิวหนัง มะเร็งตับ และเกิดจุดสีดำบนฝ่ามือฝ่าเท้าได้ (Chen et al., 2005; Raghunath et al., 1999) การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว อาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การใช้น้ำที่ปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูเพื่อการเพาะปลูก การปนเปื้อนของดินเพาะปลูกจากกิจกรรมการทำเหมืองแร่ การใช้ปุ๋ยและยาฆ่าแมลงที่มีแคดเมียมและสารหนูเป็นองค์ประกอบ ดังสรุปในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ (Meharg and Rahman, 2003; Hu et al., 2016) การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว นับเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญในหลายพื้นที่ เช่น การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในข้าวที่เพาะปลูกในดินปนเปื้อนรอบ

เหมือนแรรในประเทศจีนที่พบความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าวมีค่าเท่ากับ 0.10 และ 0.52 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ปริมาณสารหนูในเมล็ดข้าวดังกล่าวมีค่าสูงกว่ามาตรฐานอาหารของ FAO/WHO (0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ถึง 2.62 เท่า และยังพบว่า การรับสัมผัสแคดเมียมผ่านการบริโภคข้าวที่ปนเปื้อนของประชากรในพื้นที่ดังกล่าวในระยะเวลาอันยาวนานอาจทำให้เกิดโรคมะเร็งระดับคิดเป็นร้อยละ 99.77 (Fan et al., 2017) และยังมีรายงานพบการปนเปื้อนสารหนูในข้าวในรัฐเบงกอลตะวันตกของประเทศไทยที่พบความเข้มข้นของสารหนูในข้าวสูงถึง 0.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และยังพบว่า การบริโภคข้าวที่ปนเปื้อนในพื้นที่ดังกล่าวมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับการเกิดโรคมะเร็งอีกด้วย (Mondal and Polya, 2008) ปัญหาการปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าวสูงเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ FAO/WHO กำหนดที่ 0.4 และ 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับสรุปได้ดังตารางที่ 3



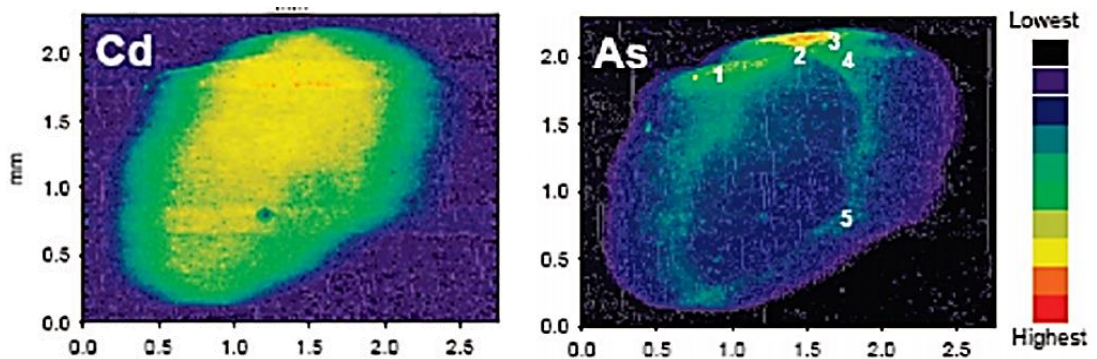
รูปที่ 2 แหล่งที่มาของการปนเปื้อนแคดเมียมในดินนาข้าวและเมล็ดข้าว

ที่มา : Hu et al. (2016)



รูปที่ 3 แหล่งที่มาของการปนเปื้อนสารหนูในดินนาข้าวและเมล็ดข้าว
ที่มา : Azam et al. (2016)

ในส่วนของการกระจายตัวของแคดเมียมและสารหนูที่พบปนเปื้อนในเมล็ดข้าวนั้น พบว่า แคดเมียมมักสะสมเป็นปริมาณมากในบริเวณเอนโดสเปิร์ม (Endosperm) หรือบริเวณเนื้อเยื่อชั้นในของเมล็ดข้าว ส่วนสารหนูนั้นมักสะสมมากในบริเวณเนื้อเยื่อชั้นกลางของข้าว (Meharg et al., 2008) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การกระจายตัวและการสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว
ที่มา : Meharg et al. (2008)

ตารางที่ 3 การปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าวของประเทศต่าง ๆ

| ประเทศ | ธาตุ | ความเข้มข้นเฉลี่ย (มก./กก.) | ช่วงความเข้มข้น (มก./กก.) | เอกสารอ้างอิง |
|--------------|----------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| จีน | สารหนู | 0.14 | 0.03 – 0.44 | Li et al. (2015) |
| ไต้หวัน | สารหนู | 0.10 | 0.01 – 0.63 | Lin et al. (2003) |
| เวียดนาม | สารหนู | 0.21 | 0.03 – 0.47 | Phuong et al. (1999) |
| บังคลาเทศ | แคดเมียม | 0.10 | 0.06 – 1.31 | Meharg et al. (2013); |
| | สารหนู | 0.14 | 0.002 – 0.56 | |
| อินเดีย | แคดเมียม | 0.08 | 0.03 – 1.00 | Rahman et al. (2009) |
| | สารหนู | 0.36 | 0.18 – 0.70 | |
| ไทย | แคดเมียม | 0.03 | 0.02 – 0.07 | |
| | สารหนู | 0.14 | 0.01 – 0.39 | |
| ญี่ปุ่น | แคดเมียม | 0.06 | 0.05 – 0.14 | |
| | สารหนู | 0.19 | 0.07 – 0.42 | |
| สหรัฐอเมริกา | แคดเมียม | 0.02 | 0.02 – 0.04 | |
| | สารหนู | 0.25 | 0.03 – 0.66 | |
| สเปน | แคดเมียม | 0.02 | 0.02 – 0.14 | |
| | สารหนู | 0.20 | 0.05 – 0.82 | |

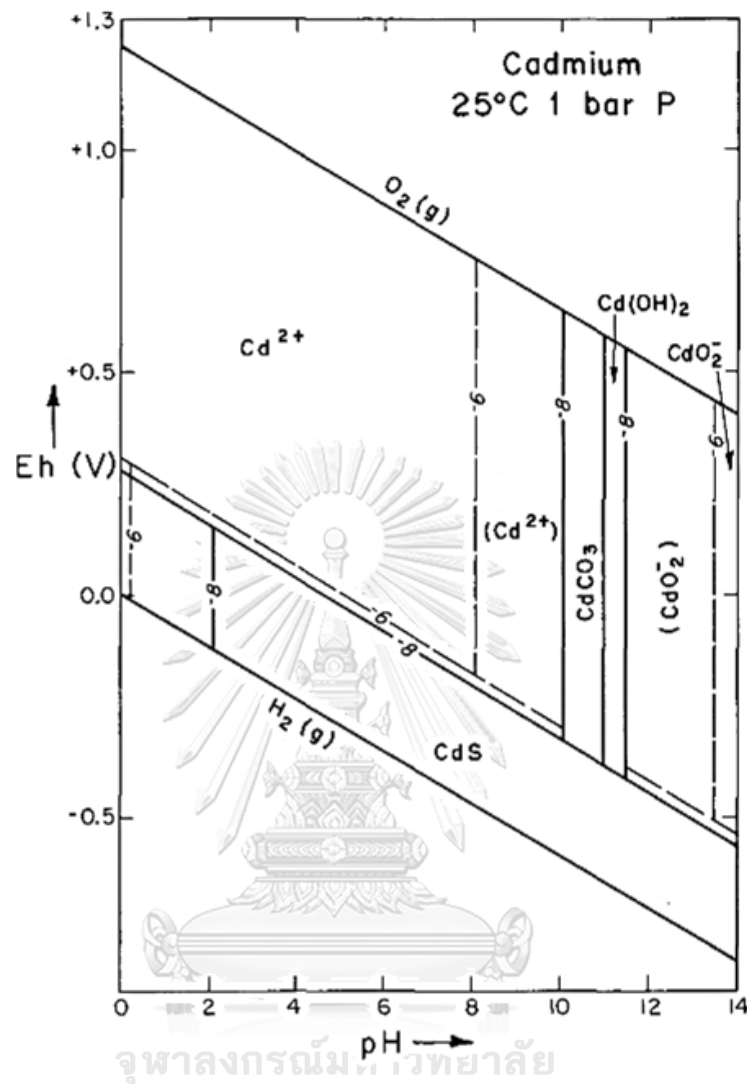
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมแคดเมียมและสารหนูในข้าว

ลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินที่มีผลต่อการสะสมแคดเมียมและสารหนูในข้าว ประกอบไปด้วย ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-reduction Potential) ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน (Soil pH) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity: CEC) ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Organic Matter: OM) และความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในสภาพพร้อมใช้ (Bioavailable Cd and As Concentrations) ผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อการสะสมแคดเมียมและสารหนูในข้าว มีรายละเอียดโดยสรุปดังนี้

2.3.1 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดิน (Oxidation-reduction Potential: Eh)

การเปลี่ยนแปลงของค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Eh) ของดิน เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางเคมีของธาตุโลหะหนัก เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันนั้นเป็นตัวควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในดินตะกอนและดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ ผลของการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนจะทำให้ตัวให้อิเล็กตรอน (Electron Donor) มีวาเลนซ์ (Valence) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ตัวรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) มีวาเลนซ์ลดลง การเปลี่ยนแปลงเลขวาเลนซ์ของธาตุจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของแร่ธาตุ เช่น เปลี่ยนจากแร่หรือของแข็งไปอยู่ในรูปของสารละลาย หรือเปลี่ยนจากสารละลายไปอยู่ในรูปแก๊ส เป็นต้น ทั้งนี้การสูญเสียอิเล็กตรอนไปจากอะตอม (Atom) คือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการรับอิเล็กตรอน คือการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่สมบูรณ์จะต้องมีทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชัน

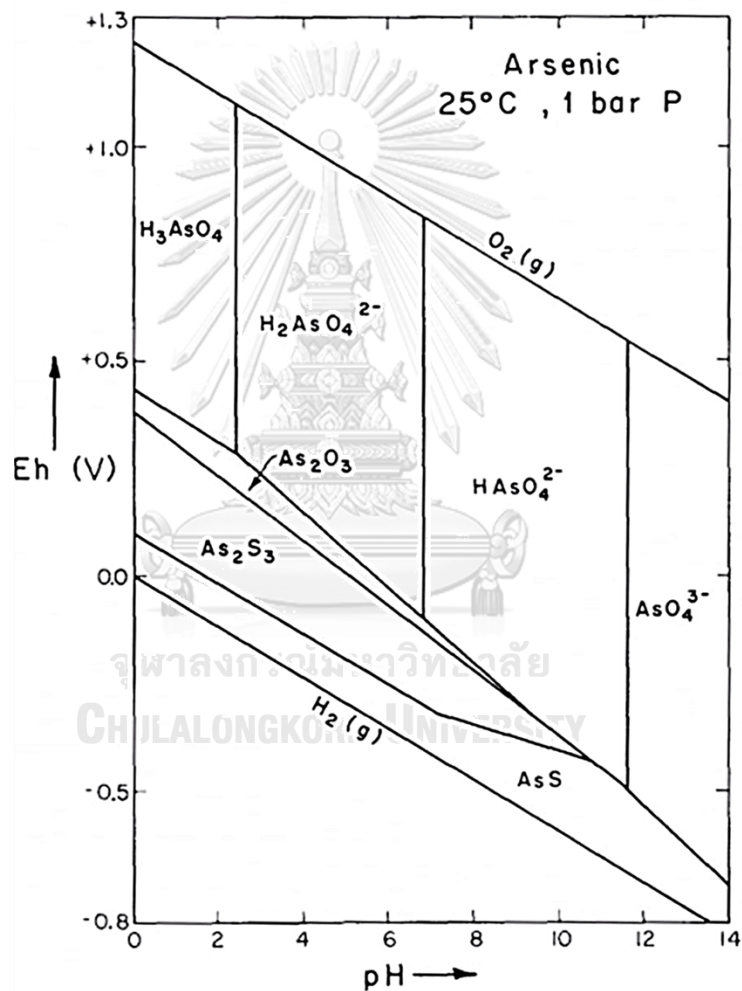
แคดเมียมในดินโดยส่วนใหญ่มักพบในรูปของไอออนอิสระ (Cd^{2+}) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในดินนั้น ส่วนมากจะมีสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในดิน (Microorganism) เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา กล่าวคือ เมื่อดินอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนจะเกิดการสูญเสียไนเตรท (NO_3^-) และเกิดการสะสมของแอมโมเนีย (NH_4^+) ซึ่งการสูญเสียไนเตรท (NO_3^-) นั้นเกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์นำไนเตรท (NO_3^-) มาเป็นตัวรับอิเล็กตรอนและไนเตรท (NO_3^-) จะถูกรีดิวซ์ไปเป็นไนไตรท (NO_2^-) และก๊าซไนโตรเจน โดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) จึงส่งผลทำให้ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันลดลง (Husson, 2013) และมีรายงานว่าเมื่อค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันลดลงจนอยู่ในช่วง 0.3 ถึง -0.4 โวลต์ (V) แคดเมียม (Cd^{2+}) จะตกตะกอนอยู่ในรูปของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เนื่องจากแคดเมียมถูกดูดซับด้วยเหล็ก (Fe^{2+}) และ/หรือแมงกานีส (Mn^{2+}) และเมื่อความเป็นกรด-ด่างของน้ำอยู่ในช่วงระหว่าง 10 ถึง 11 และค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน อยู่ในช่วง -0.3 ถึง 0.8 โวลต์ แคดเมียมจะอยู่ในรูปฟอร์มของแคดเมียมคาร์บอเนต ($CdCO_3$) ซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ (Hu et al., 2013; Sun et al., 2007) ในทางตรงกันข้ามเมื่อค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันสูงขึ้น จะส่งผลทำให้แคดเมียมเปลี่ยนรูปร่างไปอยู่ในรูปของแคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) ทำให้ต้นข้าวสามารถดูดดึงแคดเมียมไปสะสมในส่วนต่าง ๆ ได้มากขึ้น (Sebastian and Prasad, 2014) ดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 7



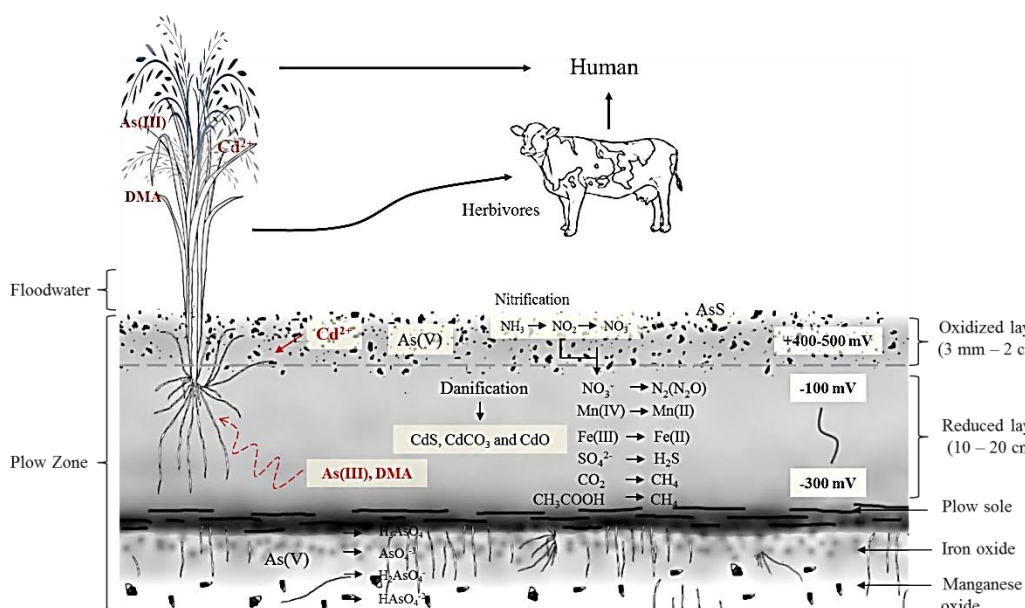
รูปที่ 5 แผนภาพความสัมพันธ์ของ Eh และ pH ต่อรูปฟอร์มทางเคมีของแคดเมียม
ที่มา : Brookins (1986)

สารหนูในธรรมชาติโดยส่วนใหญ่มักพบในรูปของสารประกอบมากกว่ารูปอิสระ ในสถานะที่มีออกซิเจนสารหนูจะอยู่ในรูป As(V) ส่วนสถานะที่ไม่มีออกซิเจนสารหนูจะอยู่ในรูป As(III) กล่าวคือเมื่อดินอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจนจะทำให้ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันลดลง ส่งผลทำให้ As(V) เปลี่ยนรูปฟอร์มไปอยู่ในรูปของ As(III) ซึ่งมีความสามารถในการละลายสูง เนื่องจากการสลายตัวของเหล็กออกไซด์ Fe(III) และการเปลี่ยนแปลง Fe(III) เป็น Fe(II) Hydroxide, Fe_3O_4 (Magnetite), Fe(II)-Fe(III) Hydroxides (Green Rust), FeCO_3 (Siderite), และ Fe Sulfides นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าในสภาวะที่น้ำมีออกซิเจนละลายอยู่ มีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของน้ำสูงจะ

ส่งผลทำให้ As(V) เปลี่ยนรูปฟอร์มไปอยู่ในรูปของ Arsenic Acid (H_3AsO_4), Arsenic Ion (AsO_4^{3-}), Dihydrogen Arsenate (H_2AsO_4^-) และ Hydrogen Arsenate (HAsO_4^{2-}) ในขณะที่สภาวะค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของน้ำอยู่ประมาณ 0 โวลต์และค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำอยู่ในช่วง 8.0 ถึง 11.0 พบว่าสารประกอบของสารหนูมักจะอยู่ในรูปของสารหนูซัลไฟด์ (AsS) มากที่สุด เช่น รีอัลการ์ (As_4S_4) ออพิเมนต์ (As_2S_3) ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำ (Gavis and Ferguson, 1972; Adriano, 2001) ดังแสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7



รูปที่ 6 แผนภาพความสัมพันธ์ของ Eh และ pH ต่อรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนู
ที่มา : Brookins (1986)



รูปที่ 7 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันและปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นในดินนาข้าวที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของดิน

ที่มา : ดัดแปลงจาก Khaokaew et al. (2015)

2.3.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในดินเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความสามารถในการละลายและการกระจายตัวของแคดเมียมและสารหนูในดิน (Zeng et al., 2011; Sarwar et al., 2010) เนื่องจากในสถานะที่ดินมีความค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้นส่งผลทำให้การเคลื่อนที่ของโลหะหนักในดินลดลง เนื่องจากไอออนของโลหะหนักต่าง ๆ ในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนประจุได้จะมีปริมาณลดลง โดยปกติค่าความเป็นกรด-ด่างของดินจะส่งผลโดยตรงต่อการยึดเกาะของโลหะหนักในดิน กล่าวคือเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของดินมีค่าต่ำลงประสิทธิภาพในการยึดเกาะของโลหะหนักในดินจะลดลงด้วย

แคดเมียม (Cd^{2+}) เป็นรูปฟอร์มที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติเป็นส่วนมาก ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปไอออนเชิงซ้อน (Complex Ion) สารประกอบแคดไอออน เช่น $CdCl^+$, $CdOH^+$, $CdHCO_3^+$ สารประกอบแอนไอออน เช่น $CdCl_3^-$, $CdCl_4^{2-}$, $Cd(OH)_3^-$, $Cd(OH)_4^{2-}$ และสารประกอบอื่น ๆ เช่น CdO , $CdCO_3$ ซึ่งมีความสามารถในการละลายได้ในสถานะของค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกัน นอกจากนั้นแล้วค่าความเป็นกรด-ด่างของดินยังมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการสะสมของแคดเมียมในพืช เพราะค่าความเป็นกรด-ด่างของดินจะมีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันใน

ดินด้วย (Kirkham, 2006; Zeng et al., 2011) กล่าวคือ เมื่อดินมีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 2 ถึง 4 และมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันประมาณ 0 ถึง 0.8 โวลต์ แคดเมียมจะอยู่ในรูปของ (Cd^{2+}) ซึ่งมีความสามารถในการละลายสูง เนื่องจากสภาพที่ดินมีความเป็นกรดจะส่งผลทำให้เพิ่ม การละลายของแคดเมียมที่อยู่ในรูปฟอร์มของแคดเมียมคาร์บอเนต ($CdCO_3$) แคดเมียมไฮดรอกไซด์ ($Cd(OH)_2$) และแคดเมียมออกไซด์ (CdO_2) ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเป็นกรด-ด่างของดินสูงกว่า 7.5 และมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน อยู่ในช่วง -0.5 ถึง 0 โวลต์ จะทำให้ความสามารถในการละลายของแคดเมียมจะลดลง เนื่องจากแคดเมียม (Cd^{2+}) จะตกตะกอนอยู่ในรูปของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของดินมากกว่า 7.5 แคดเมียมจะอยู่ในรูปฟอร์มของแคดเมียมคาร์บอเนต ($CdCO_3$) ซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5

สารหนู As(III) และ As(V) เป็นรูปฟอร์มที่ส่วนมากสามารถพบได้โดยทั่วไปในธรรมชาติ ในสถานะที่มีออกซิเจนสารหนูจะอยู่ในรูป As(V) ของสารประกอบ เช่น Arsenic Acid (H_3AsO_4), Arsenic Ion (AsO_4^{3-}), Dihydrogen Arsenate ($H_2AsO_4^-$) และ Hydrogen Arsenate ($HAsO_4^{2-}$) ส่วนในสถานะที่ไม่มีออกซิเจนนั้นสารหนูจะอยู่ในรูป As(III) ทั้งนี้สารหนูจะอยู่ในรูปของสารประกอบใดนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันเป็นหลัก การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมทั้ง 2 ปัจจัยนี้ยังเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงรูปฟอร์มของสารหนูอีกด้วย (Sharma and Sohn, 2009) กล่าวคือ เมื่อดินมีค่าความเป็นกรด-ด่าง มากกว่า 7.5 สารหนูจะอยู่ในรูปของ $HAsO_4^{2-}$ และ AsO_4^{3-} ซึ่งมีความสามารถในการละลายสูง เนื่องจากในสถานะที่ดินมีค่าความเป็นด่างสูงจะส่งผลทำให้เกิดการตกตะกอนระหว่างสารหนูกับเหล็กลดลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเป็นกรด-ด่างของดินต่ำกว่า 6.5 และมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน อยู่ในช่วง 0 ถึง 1.2 โวลต์ สารประกอบสารหนูจะอยู่ในรูปของ Arsenic Acid (H_3AsO_4), และ Dihydrogen Arsenate ($H_2AsO_4^-$) ในขณะที่สถานะค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของน้ำ อยู่ในช่วง -0.7 ถึง 0 โวลต์ พบว่าสารประกอบสารหนูมักจะอยู่ในรูปของสารหนูซัลไฟด์ (As_2S_3) มากที่สุด เช่น รีอัลการ์ (As_4S_4) ออพิเมนต์ (As_2S_3) ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำ ซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 6

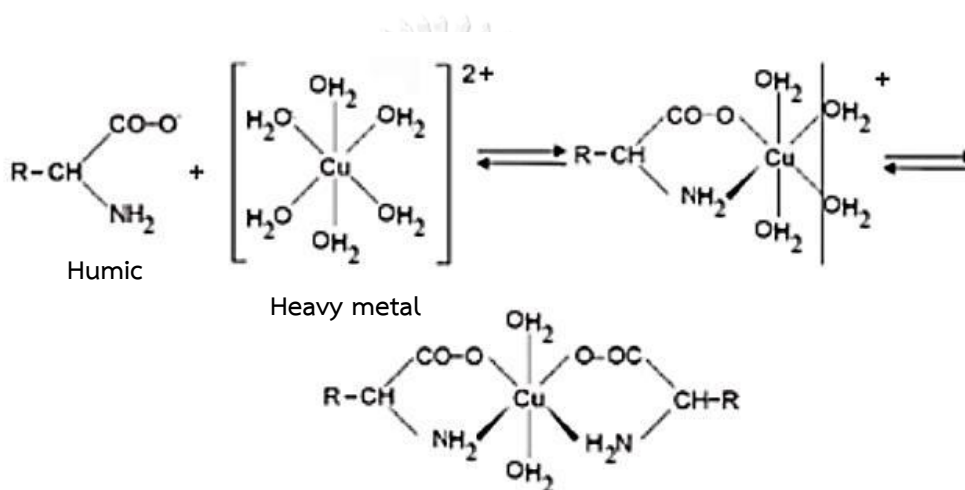
2.3.3 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity: CEC)

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน แสดงถึงความสามารถของดินในการดูดซับ และแลกเปลี่ยนประจุบวกไว้กับอนุภาคของดิน (Brady and Weil, 2010) การแลกเปลี่ยนประจุบวก จะเกิดขึ้นได้เมื่อผิวของอนุภาคดินหรือคอลลอยด์มีประจุเป็นลบที่มากเกินไป ประจุลบในดินสามารถ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) ประจุลบที่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนได้ ซึ่งมักพบในโครงร่างผลึกของดิน เช่น Tetrahedral Sheet ของดินเหนียวประเภท Vermiculite เป็นต้น และ 2) ประจุลบที่สามารถ แลกเปลี่ยนได้โดยง่าย ประจุลบชนิดนี้มักเกิดจากหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ เช่น หมู่คาร์บอกซิล หรือ อาจเกิดจากไฮดรอกซิลของสารอนินทรีย์ต่าง ๆ ที่เกาะอยู่กับอนุภาคของดิน (Evangelou and Phillips, 2005) นอกจากนั้นแล้วค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินจะมีค่ามากหรือน้อยยังขึ้นอยู่กับชนิดของคอลลอยด์ในดินอีกด้วย คอลลอยด์ที่ต่างชนิดกันจะมีความสามารถในการ แลกเปลี่ยนประจุบวกแตกต่างกันไป นอกจากนั้นแล้วความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกยัง ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของอนุภาคแร่ดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุในดินอีกด้วย กล่าวคือ เมื่อดินมีสัดส่วนของ องค์ประกอบของดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุในปริมาณมากจะทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยน ประจุบวกในดินสูงตามไปด้วย ดังเช่น (Ge and Hendershot, 2004) ที่ศึกษาและพบว่าประจุที่ผิว อนุภาคของดินในประเทศแคนาดามีคุณสมบัติแตกต่างกัน เนื่องจากดินนั้นมีปริมาณอินทรีย์วัตถุ ต่างกันจะส่งผลทำให้ Variable Surface Charge สูงขึ้น และทำให้ดินดังกล่าวมีประจุที่ผิวอนุภาคที่ สามารถจับกับโปรตอนสูงตามไปด้วย

2.3.4 อินทรีย์วัตถุ (Organic Matter: OM)

อินทรีย์วัตถุในดิน (Soil Organic Matter) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่และ ความสามารถในการละลายของแคตไอออนและสารหนูในดิน เนื่องจากอนุภาคของอินทรีย์วัตถุนั้นมี ประจุลบอยู่เป็นจำนวนมากทำให้มีความสามารถในการดูดซับประจุบวกสูงกว่าอนุภาคคอลลอยด์ อื่น ๆ ประมาณ 2-30 เท่า นอกจากนั้นดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงยังมีความต้านทานต่อการ เปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของดินได้ ทำให้ความสามารถในการละลายของโลหะหนักในดินไม่ เกิดการเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากแคตไอออนที่เป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) ซึ่งจะทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง จะถูกอินทรีย์วัตถุดูดซับไว้ จึงทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน เปลี่ยนแปลงได้ยาก นอกจากนั้นแล้วอินทรีย์วัตถุในดินยังมีส่วนประกอบของฮิวมิก (Humic) ที่มี

โครงสร้างซับซ้อน มีโครงสร้างแกนหลักเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นวง (Aromatic Compound) จึงทำให้อยู่สลายได้ยาก และมีประจุเป็นลบที่ผิวอนุภาคจึงสามารถจับกับประจุบวกของแร่ธาตุในดิน เช่น ธาตุที่เป็นอาหารของพืช และธาตุที่เป็นโลหะหนักอันตรายในดินได้ รูปที่ 8 แสดงการจับตัวกันของโลหะหนักกับอินทรีย์วัตถุในดิน นอกจากนั้นแล้วอินทรีย์วัตถุในดินยังมีองค์ประกอบที่ไม่ใช่ฮิวมิก เช่น สารประกอบที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและย่อยสลายได้ง่าย เช่น กรดอะมิโน (Amino Acid) อีกด้วย สารประกอบเหล่านี้สามารถจับกับอนุภาคดินเหนียวและทำปฏิกิริยากับประจุบวกของโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก อะลูมิเนียม หรือทองแดงที่อยู่ในดินได้อีกด้วย



รูปที่ 8 ตัวอย่างแสดงการจับตัวกันของโลหะหนักกับอินทรีย์วัตถุในดิน

ที่มา : Mouta et al. (2008)

2.3.5 ความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในสภาพพร้อมใช้ (Bioavailable Cd and As Concentrations)

ราชบัณฑิตสถานบัญญัติความหมายของ Bioavailable (ชีวปริมาณออกฤทธิ์) คือ ปริมาณส่วนหนึ่งของโลหะหนักทั้งหมดในดิน (Total Concentration) ที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำขึ้นไปสะสมในเซลล์ (Cells) ได้ หรือกล่าวได้ว่าเป็นปริมาณของโลหะที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ (Davis et al., 1994) ซึ่งชีวปริมาณออกฤทธิ์ (Bioavailable) นี้เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการสะสมแคดเมียมและสารหนูในข้าว ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในสภาพพร้อมใช้ในดินนั้นจะมีค่ามากหรือน้อย นอกจากจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดินแล้ว ยังอาจขึ้นอยู่กับคุณสมบัติบางประการของดิน เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน

ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Pietrzykowski et al., 2014; Römken et al., 2009)

การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้โดยทั่วไปสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีสกัดแบบเดียวที่ใช้กรดเอทิลีนไดอะมีนเตตราอะซิติก (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid: EDTA) นั้นเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดสำหรับการสกัดแยกโลหะหนักในดินนาข้าว เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งยังมีรายงานว่ากรดเอทิลีนไดอะมีนเตตราอะซิติกยังเป็นสารคีเลตที่มีประสิทธิภาพสูงในการเพิ่มความสามารถในการละลายของโลหะหนักในดินนาข้าว (Pociecha and Lestan, 2010; Pociecha et al., 2011; Bareen and Tahira, 2011; Jalali and Tabar, 2013) ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาเปรียบเทียบการสกัดดินปนเปื้อนแคดเมียมโดยกรดเอทิลีนไดอะมีนเตตราอะซิติก (EDTA) และกรดคาร์บอกซิลิก (CH_3COOH) พบว่าร้อยละ 64.7 และ 51.0 ของความเข้มข้นทั้งหมดแคดเมียมนั้นเป็นแคดเมียมที่อยู่ในรูปแบบที่พืชสามารถนำไปสะสมในเซลล์ได้จากการสกัดโดยสารสกัดทั้ง 2 ชนิด (Liu et al., 2017) ในขณะที่ Gregori et al. (2004) ทำการสกัดดินปนเปื้อนสารหนูโดยใช้กรดเอทิลีนไดอะมีนเตตราอะซิติกในดินเพื่อการเกษตรกรรมโดยรอบเหมืองแร่ และพบว่าร้อยละ 9 ถึง 34 ของสารหนูทั้งหมดนั้นเป็นสารหนูที่อยู่ในฟอร์มที่พืชสามารถนำไปสะสมในเซลล์ได้ ตัวอย่างผลการวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า กรดเอทิลีนไดอะมีนเตตราอะซิติก (EDTA) เป็นสารเคมีที่มีความสามารถในการละลายโลหะหนักในดินได้ดี ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถูกสกัดออกมาจากดินด้วย EDTA สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดที่ดีของการถ่ายโอนโลหะหนักจากดินสู่พืชอาหารได้

ในส่วนของพื้นที่ตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก มีรายงานการศึกษาการวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในดินนาข้าวจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น Akkajit and Tongcumpou (2010) ศึกษาารูปฟอร์มของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินนาข้าวโดยใช้กรดแอสติก (Acetic acid) และพบว่าร้อยละ 2.7 ถึง 58.4 ของความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดเป็นแคดเมียมที่อยู่ในรูปฟอร์มที่พืชสามารถนำไปสะสมในเซลล์ได้ ในขณะที่ Kosolsaksakul et al. (2014) ทำการสกัดดินปนเปื้อนแคดเมียมในระดับสูง (< 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) โดยใช้กรดแอสติก (Acetic acid) พบว่าร้อยละ 67 ถึง 84 ของความเข้มข้นของแคดเมียมทั้งหมดเป็นแคดเมียมที่อยู่ในรูปฟอร์มที่พืชสามารถนำไปสะสมในเซลล์ได้ เช่นเดียวกับ Sriprachote et al. (2014) ที่ทำการสกัดดินที่ปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่นาข้าว 2 ระดับ คือ ดินปนเปื้อนแคดเมียมในนาพื้นที่ต่ำ (Lower-paddy Field)

และดินปนเปื้อนแคดเมียมในนาบนพื้นที่สูง (Upper-paddy Field) โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.1 M เป็นสารสกัด พบว่าร้อยละ 15 และร้อยละ 61 ของความเข้มข้นทั้งหมดของ แคดเมียมที่ปนเปื้อนอยู่ในนาพื้นที่ต่ำและนาบนพื้นที่สูง ตามลำดับ เป็นแคดเมียมที่อยู่ในรูปฟอร์มที่ พืชสามารถนำไปสะสมในเซลล์ได้

2.4 การจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูก (Water Management)

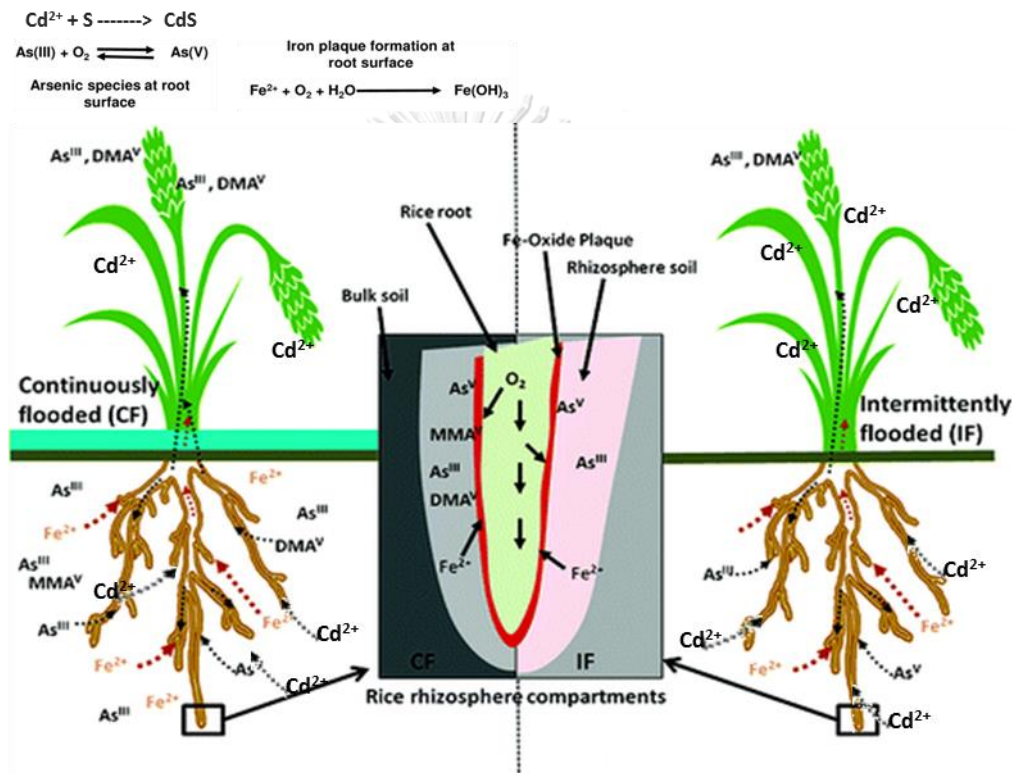
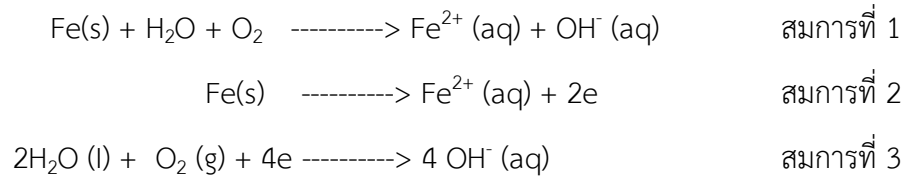
การจัดการน้ำในระหว่างการเพาะปลูกข้าว (Water Management) คือ การควบคุมน้ำในนา ข้าวให้เหมาะสมตามระยะการเจริญเติบโตของข้าว ในอดีตหลายประเทศ (ประมาณ 114 ประเทศ) มักทำการเพาะปลูกข้าวแบบให้น้ำขัง (ระดับน้ำสูงประมาณ 5 ถึง 10 เซนติเมตร) เพื่อป้องกันวัชพืช และเพื่อความสะดวกต่อการไถพรวน อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันพบว่าการจัดการน้ำในระหว่างการเพาะปลูก ข้าวสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น การเพาะปลูกข้าวแบบน้ำขัง (Flooded Condition) การเพาะปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition) และการเพาะปลูก ข้าวแบบประหยัดน้ำ (Water-saving Condition) เพื่อวัตถุประสงค์ในการเพาะปลูกต่าง ๆ เช่น การเพิ่มผลผลิตข้าว การลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในนาข้าว และการจัดการพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักเป็นต้น (Wichelns, 2016; Datta et al., 2017) รูปแบบการจัดการน้ำในระหว่างการเพาะปลูก ข้าวที่ต่างกันนี้สามารถส่งผลต่อการละลายของแคดเมียมและสารหนูในดินและการสะสมแคดเมียม และสารหนูในข้าวอีกด้วย (Bingham et al., 1976; de Livera et al., 2011)

มีรายงานว่าการจัดการน้ำในระหว่างการเพาะปลูกข้าวมีความสัมพันธ์ทางบวกอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของข้าว (Sebastian and Prasad, 2014) ยกตัวอย่างเช่น Ishikawa et al. (2016) ศึกษาผลของการจัดการน้ำในระหว่างการเพาะปลูก ข้าวแบบน้ำขัง (Continuously Flooded) แบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition) และแบบประหยัดน้ำ (Water-saving Condition) ต่อการสะสมแคดเมียมและสารหนูใน เมล็ดข้าว พบว่าการเพาะปลูกข้าวแบบน้ำขังตลอดระยะเวลาการเพาะปลูกทำให้การสะสมแคดเมียม ในข้าวลดลงถึง 8 เท่า เมื่อเทียบกับการสะสมแคดเมียมในข้าวที่เพาะปลูกโดยวิธีการจัดการน้ำแบบ ประหยัดน้ำ เช่นเดียวกับ Hu et al. (2013) ที่พบว่า การเพาะปลูกข้าวแบบน้ำขังตลอดระยะเวลาการ เพาะปลูกนั้นทำให้การสะสมแคดเมียมในเมล็ดข้าวกล้องมีค่าลดลงถึง 2 เท่า เมื่อเทียบกับการสะสม แคดเมียมในข้าวที่เพาะปลูกโดยรูปแบบการจัดการน้ำแบบประหยัดน้ำ เนื่องจากการขังน้ำตลอด

ระยะเวลาการเพาะปลูกจะทำให้ดินอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินลดลง อยู่ในช่วง -76 ถึง -41 มิลลิโวลต์ (mV) และค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเปลี่ยนไป ส่งผลให้เหล็ก (Fe) ที่อยู่ในอนุภาคดินทำปฏิกิริยากับน้ำ (H₂O) และออกซิเจน (O₂) ทำให้น้ำที่ถูกขังอยู่มีค่าความเป็นด่างมากขึ้น และเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ดังสมการที่ 1 ถึงสมการที่ 3 สภาวะดังกล่าวนี้ส่งผลให้แคดเมียมเกิดการจับตัวกับ Fe(OH)₃ และตกตะกอนอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้น้อย หรือไม่ละลายน้ำ (Talukder et al., 2014) นอกจากนี้ McBride (1989) พบว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยารีดักชันในดินแล้วจะทำให้แคดเมียมจับตัวกับซัลไฟด์ (S) และตกตะกอนอยู่ในรูปฟอร์มของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ทำให้ความสามารถในการละลายของแคดเมียมลดลง ด้วยเหตุนี้การสะสมแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของข้าวจึงลดลงตามไปด้วย ดังรูปที่ 8 (Kikuchi et al., 2008)

ในส่วนของสารหนูนั้น Somenahally et al. (2011) ได้ศึกษาผลของการจัดการน้ำในระหว่างการเพาะปลูกข้าวแบบน้ำขัง (Continuously Flooded) และการเพาะปลูกข้าวแบบน้ำขังเป็นช่วง ๆ (Intermittently Flooded) ต่อการสะสมสารหนูในรูปฟอร์มต่าง ๆ (Arsenic Speciation) ในข้าว พบว่าการเพาะปลูกข้าวแบบน้ำขังเป็นช่วง ๆ มีผลทำให้การสะสมสารหนูในรากของต้นข้าว และเมล็ดข้าวลดลงถึงร้อยละ 55 และร้อยละ 41 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ การสะสมสารหนูในรากของต้นข้าวและเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกข้าวในสภาวะแบบน้ำขัง เนื่องจากการขังน้ำในดินนาข้าวจะส่งผลทำให้ดินเกิดปฏิกิริยารีดักชันหรือสภาวะไร้ออกซิเจน ทำให้ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Eh) และค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเปลี่ยนไป กล่าวคือเมื่อเหล็ก (Fe) ทำปฏิกิริยากับน้ำ (H₂O) และออกซิเจน (O₂) ส่งผลทำให้น้ำอยู่ในสภาวะที่เป็นด่าง เมื่อเหล็กสัมผัสกับอากาศและความชื้น อะตอมของเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเมื่อน้ำและออกซิเจนรับอิเล็กตรอนจากเหล็กจะส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ดังสมการที่ 1 ถึงสมการที่ 3 ดังนั้นเมื่อดินเกิดปฏิกิริยารีดักชัน จะส่งผลทำให้สารหนูเปลี่ยนจากรูป (As(V)) เป็น (As(III)) ซึ่งเป็นรูปฟอร์มของสารหนูที่มีความสามารถในการละลายสูง อีกทั้งเมื่อค่าความเป็นด่างของดินสูงขึ้นก็จะส่งผลทำให้ความสามารถในการละลายของสารหนูเพิ่มสูงขึ้นด้วย เนื่องมาจากการสลายตัวของออกไซด์ของ Fe(III) ส่งผลให้การสะสมสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของข้าวเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อดินอยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic Condition) จะทำให้ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน อยู่ในช่วง 135 ถึง 138 มิลลิโวลต์ ส่งผลให้สารหนูเกิดการตกตะกอนร่วมกับเหล็ก (Fe) จึงทำให้ความสามารถในการละลายของ

สารหนูลดลง (Honma et al., 2016; Somenahally et al., 2011; Talukder et al., 2014) ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การสะสมแคดเมียมและสารหนูในระหว่างการเพาะปลูกข้าวแบบน้ำขัง (Continuously Flooded) และการเพาะปลูกข้าวแบบน้ำขังเป็นช่วง ๆ (Intermittently Flooded)

ที่มา : Somenahally et al. (2011)

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

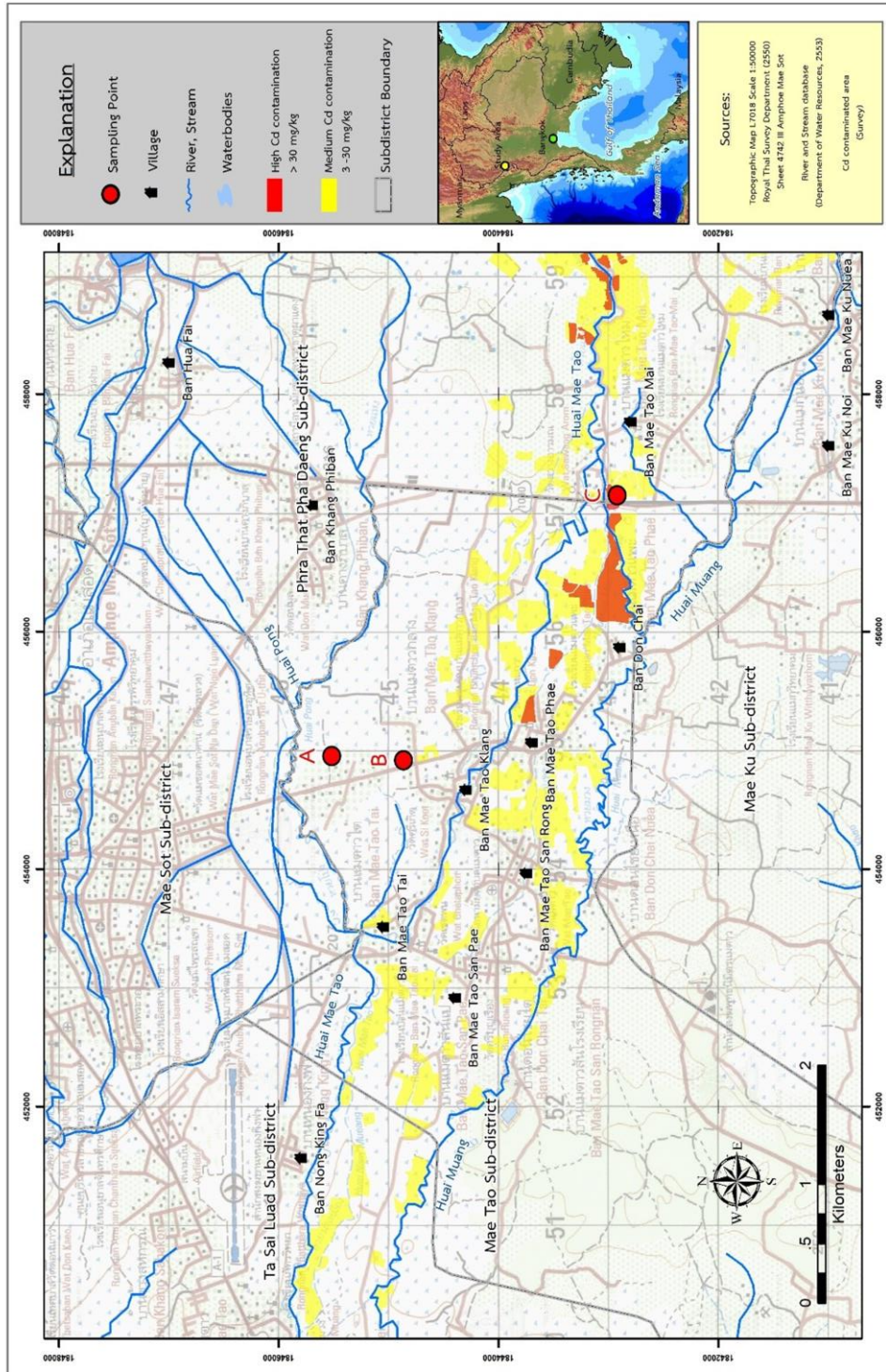
3.1 การเก็บตัวอย่างดิน

การศึกษานี้ได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างดินนาข้าวแบบสุ่มเชิงประกอบ (Composite Simple Random Sampling) จากพื้นที่นาข้าว ในตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก (รูปที่ 10) เป็นจำนวน 3 พื้นที่ ซึ่งเป็นพื้นที่นาข้าวที่มีรายงานการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าเป็นพื้นที่ทำนาที่มีระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมในเมล็ดข้าวสูงเกินเกณฑ์ที่ FAO/WHO กำหนดที่ 0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2558) ทั้งนี้พิกัดภูมิศาสตร์และข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินนอกฤดูกาลเพาะปลูกข้าวของพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 พื้นที่ แสดงดังตารางที่ 4

ก่อนการเก็บตัวอย่างดินได้มีการดำเนินการเอาสิ่งปกคลุมหน้าดินออกแล้วจึงใช้จอบ พลั่ว และเสียม ขุดเจาะดินให้เป็นหลุมรูปตัววี (V) ที่ระดับความลึกประมาณ 0-20 เซนติเมตร เพื่อเก็บตัวอย่างดิน แล้วจึงเก็บตัวอย่างดินประมาณ 30 กิโลกรัม ต่อ 1 จุดเก็บตัวอย่าง ทั้งนี้การศึกษานี้ได้คัดเลือกจุดเก็บตัวอย่างแบบสุ่มทั้งสิ้น 5 จุดต่อ 1 พื้นที่ศึกษา เมื่อทำการเก็บตัวอย่างดินจากแต่ละจุดเก็บตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำตัวอย่างดินทั้งหมดมาคลุกเคล้าและผสมรวมให้เป็นตัวอย่างเดียวกัน (Composite Sample) และเก็บใส่ถุงพลาสติก แล้วขนย้ายไปยังห้องปฏิบัติการในลำดับต่อไป

ตารางที่ 4 พิกัดภูมิศาสตร์และสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินนอกฤดูกาลเพาะปลูกข้าวของพื้นที่ศึกษา

| พื้นที่ศึกษา | พิกัดภูมิศาสตร์ | | ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน | |
|--------------|-----------------|----------|----------------------------|---------------------------|
| | ละติจูด | ลองจิจูด | ฤดูฝน | ฤดูแล้ง |
| A | 454953 | 1845517 | นาข้าว | ไม่มีการใช้ประโยชน์ที่ดิน |
| B | 454917 | 1844866 | นาข้าว | ไม่มีการใช้ประโยชน์ที่ดิน |
| C | 457148 | 1842921 | นาข้าว | ไร่ข้าวโพด |



รูปที่ 10 แผนที่แสดงตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาในตำบลแม่อวด อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

3.2 การเตรียมตัวอย่างดิน

ตัวอย่างดินทั้งหมดได้ถูกนำไปตากในที่ร่มจนแห้ง หลังจากนั้นจึงถูกนำมาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง (Tokalioglu et al., 2003) แล้วจึงเก็บตัวอย่างดินใส่ถุงพลาสติกแล้วเก็บในตู้ปราศจากความชื้นเพื่อการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินในลำดับต่อไป (DOA, 2010)

ในส่วนของการเตรียมดินเพื่อการเพาะปลูกนั้น ได้นำตัวอย่างดินนาข้าวทั้งหมดไปตากในที่ร่มจนแห้ง หลังจากนั้นจึงนำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดดินจนได้ขนาดใกล้เคียงกัน แล้วจึงชั่งตัวอย่างดินที่ผ่านกระบวนการบดแล้ว 250 กิโลกรัม แล้วนำมาผสมคลุกเคล้าให้ตัวอย่างดินเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นจึงชั่งดินน้ำหนัก 120 กิโลกรัม ใส่ในแปลงทดลอง ขนาด 0.49 ตารางเมตร ต่อ 1 พื้นที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 11

3.3 การเพาะปลูกข้าวด้วยวิธีการจัดการน้ำรูปแบบต่าง ๆ

1) การเพาะปลูกข้าวแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ คือ การเพาะปลูกข้าวแบบน้ำขังตลอดระยะเวลาการเพาะปลูก (Flooded Condition) กล่าวคือ หลังปักดำแล้วเสร็จ ได้ทำการปล่อยน้ำเข้าแปลงทดลอง และรักษาระดับน้ำให้อยู่เหนือหน้าดิน 15 เซนติเมตร ตลอดระยะเวลาการเพาะปลูกข้าว และ

2) การเพาะปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition) กล่าวคือ หลังปักดำแล้วเสร็จ ได้ดำเนินการปล่อยน้ำเข้าแปลงทดลองให้ระดับน้ำอยู่ระหว่างกลางข้อดอกของต้นข้าวและรักษาระดับน้ำให้สม่ำเสมอเพื่อควบคุมวัชพืช และรักษาระดับน้ำไปจนถึงต้นข้าวมีอายุ 4 สัปดาห์ หลังจากนั้นจึงระบายน้ำออกจากแปลงทดลองให้แห้ง (ระบายน้ำกลางฤดูการ) เพื่อให้รากของข้าวได้รับออกซิเจนเป็นเวลา 2 สัปดาห์ เมื่อต้นข้าวมีอายุครบ 6 สัปดาห์ จึงปล่อยน้ำเข้าสู่แปลงทดลองให้ระดับน้ำในแปลงทดลองอยู่เหนือหน้าดินประมาณ 10 เซนติเมตร โดยดำเนินการขังน้ำเป็นเวลา 1 วัน แล้วระบายออกให้แห้งเป็นเวลาอีก 4 วัน ต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนต้นข้าวมีอายุ 11 สัปดาห์ หลังจากนั้นจึงระบายน้ำในแปลงทดลองออกให้แห้งเพื่อเร่งการสุกแก่ของเมล็ดข้าว (Ishikawa et al., 2016)

การเพาะปลูกข้าวด้วยวิธีการจัดการน้ำทั้ง 2 รูปแบบนี้ได้ดำเนินการเพาะปลูกในเรือนทดลอง (Pot Experiment) โดยใช้ตัวอย่างดิน 120 กิโลกรัม ต่อการเพาะปลูกข้าว 12 ต้น ใน 1 แปลงทดลอง

และปักดำต้นข้าวให้มีระยะห่างเช่นเดียวกันกับวิธีปักดำที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ คือ 20×20 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 13 โดยดินตัวอย่างที่ถูกเก็บมาจากแต่ละพื้นที่ศึกษา (A, B และ C) จะถูกคลุกเคล้าและผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน และถูกนำมาแบ่งใส่ลงในแปลงทดลองเป็น 2 ชุด เพื่อศึกษาผลของการเพาะปลูกข้าวด้วยวิธีการจัดการน้ำ 2 รูปแบบ ต่อการสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว ดังที่ได้กล่าวข้างต้น (ตารางที่ 5)

ในส่วนต้นข้าวที่ถูกนำมาเพาะปลูกในการทดลองนั้นได้ดำเนินการเพาะกล้าจากเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นเวลา 30 วัน หลังจากนั้นจึงทำการคัดเลือกต้นกล้าที่มีขนาดและความยาวของต้นใกล้เคียงกันมาปักดำในดินที่ได้เตรียมไว้ในแปลงทดลองพร้อมกับเติมน้ำประปาให้ระดับน้ำอยู่ระหว่างกลางกอข้าว แล้วเพาะปลูกเป็นเวลาทั้งสิ้น 13 สัปดาห์ ในระหว่างการเพาะปลูกได้ดำเนินการจัดการน้ำตามวิธีการเพาะปลูกแบบน้ำขังตลอดเวลา (Flooded Condition) ดังสรุปในตารางที่ 6 และตามวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition) ดังสรุปในตารางที่ 7 และรูปที่ 14

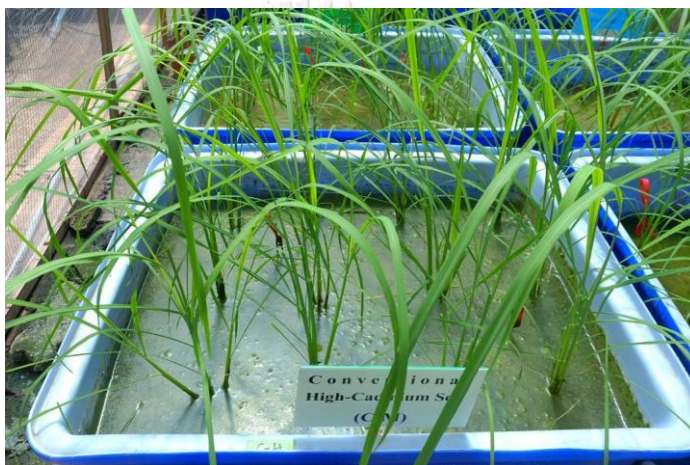
นอกจากนั้นแล้วยังได้ทำการเติมปุ๋ยเคมี จำนวน 2 ครั้งระหว่างการเพาะปลูกข้าวได้ ด้วยกระบวนการและอัตราส่วนเช่นเดียวกันกับการดำเนินการเพาะปลูกข้าวของเกษตรกรในพื้นที่ศึกษา กล่าวคือ ได้ทำการเติมปุ๋ยครั้งที่ 1 หลังการปักดำกล้าข้าว 10 วัน โดยใช้ปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0 (ปุ๋ยยูเรีย) ในอัตราส่วน 25 กิโลกรัมต่อไร่ เพื่อเร่งการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบของต้นข้าว ช่วยทำให้ข้าวมีลำต้นยาว ใบดก และมีสีเขียวเข้ม และได้ทำการเติมปุ๋ยครั้งที่ 2 ในช่วงก่อนข้าวตั้งท้องประมาณ 1 สัปดาห์ หรือเมื่อต้นข้าวมีอายุครบ 6 สัปดาห์ โดยใช้ปุ๋ยเคมีสูตร 16-12-8 ในอัตราส่วน 25 กิโลกรัมต่อไร่ เพื่อเร่งการออกรวงของข้าว และช่วยเพิ่มผลผลิตข้าว ทำให้เมล็ดข้าวเต็ม คุณภาพดี และน้ำหนักของเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 11 แปลงทดลอง (ขนาด 0.49 ตารางเมตร) สำหรับการเพาะปลูกข้าว



รูปที่ 12 ระยะห่างในการปักดำกล้าข้าว ตามวิธีการเพาะปลูกข้าวของเกษตรกรในพื้นที่ตำบลแม่ตาว อำเภอมะสอย จังหวัดตาก



รูปที่ 13 ระยะห่างของการเพาะปลูกข้าวในโรงเรือนแต่ละชุดการทดลอง

ตารางที่ 5 รายละเอียดการเพาะปลูกข้าวในแต่ละชุดการทดลอง

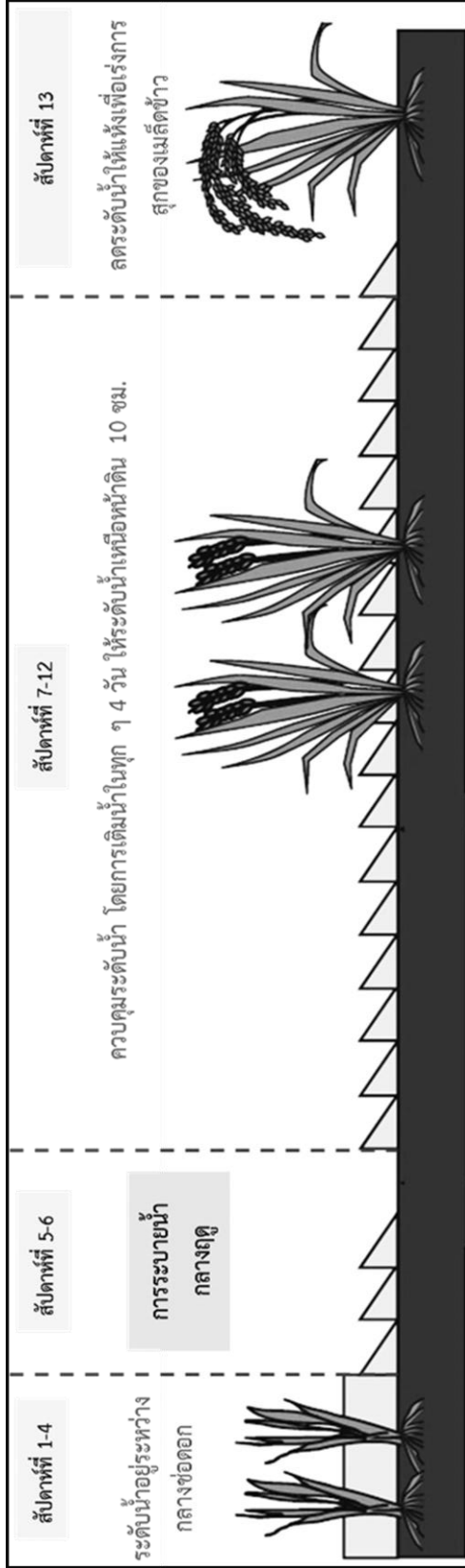
| ชุดการทดลอง | รูปแบบการจัดการน้ำระหว่าง การเพาะปลูกข้าว | พื้นที่ศึกษา |
|--------------|---|----------------------|
| Conventional | การเพาะปลูกข้าวแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรใน พื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Flooded Condition) | Conventional-A (C-A) |
| | | Conventional-B (C-B) |
| | | Conventional-C (C-C) |
| Treatment | การเพาะปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition) | Treatment-A (T-A) |
| | | Treatment-B (T-B) |
| | | Treatment-C (T-C) |

ตารางที่ 6 รายละเอียดการจัดการนำระหว่างการผลิตข้าวแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Conventional)

| ระยะการเจริญเติบโตของข้าวและ การจัดการนำระหว่างการผลิต | ระยะเวลาการปลูก (สัปดาห์) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------------|---|---|---|----------------------------|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | ระยะต้นกล้า | | | | ระยะแตกกอถึงระยะข้าวออกรวง | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| - การเพาะต้นกล้าในแปลงทดลอง | ↕ | | | ↗ | | | | | | | | | | | | | |
| - ระยะแตกกอถึงระยะข้าวออกรวง | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • ชั่งน้ำในแปลงทดลองให้ระดับน้ำ อยู่ที่หน้าดิน 15 เซนติเมตร | | | | | ↙ | | | | | | | | | ↗ | | | |
| - ระยะข้าวออกรวงถึงระยะเก็บเกี่ยว | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • ระบายน้ำออกทั้งหมด | | | | | | | | | | | | | | | | | ↕ |

ตารางที่ 7 รายละเอียดการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition)

| ระยะการเจริญเติบโตของข้าวและ การจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูก | ระยะเวลาการปลูก (สัปดาห์) | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| - การเพาะต้นกล้าในแปลงทดลอง | ↔ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| - ระยะต้นกล้าถึงระยะแตกกอ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • ชั่งน้ำให้ระดับน้ำอยู่ระหว่างกลางกอข้าว • ระบายน้ำกลางฤดูการ | | | | ↔ | | | ↔ | | | | | | | | | | |
| - ชั่งน้ำให้ระดับน้ำอยู่เหนือหน้าดิน 10 เซนติเมตร แล้วปล่อยให้แห้ง | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| - ระบายน้ำทิ้งจนถึงระยะข้าวออกรวง | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • ควบคุมระดับน้ำ โดยชั่งน้ำ 1 วัน ให้ระดับน้ำอยู่เหนือหน้าดิน 10 เซนติเมตร แล้วระบายออกให้แห้ง 4 วัน | | | | | | | | | | | | | | ↔ | | | |
| - ระบายข้าวออกรวงถึงระยะเก็บเกี่ยว | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • ระบายน้ำออกทั้งหมด | | | | | | | | | | | | | | | | ↔ | ↔ |



รูปที่ 14 การจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition)

ที่มา : Ishikawa et al. (2016)

มหาวิทยาลัย
UNIVERSITY

นอกจากนั้นแล้วระหว่างการเพาะปลูกข้าวยังได้ดำเนินการตรวจวัดลักษณะสมบัติบางประการของดิน ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในระยะเวลา ทุก ๆ 1 สัปดาห์ โดยใช้เครื่องตรวจวัด pH และ ORP แบบอัตโนมัติ ตามลำดับ และยังได้ดำเนินการตรวจวัดปัจจัยแวดล้อมของการเพาะปลูกข้าว ได้แก่ ความเข้มแสงเฉลี่ย และอุณหภูมิอากาศในโรงเรือนเพาะปลูก ในระยะเวลาทุก ๆ 1 สัปดาห์ โดยใช้เครื่อง Mini Environmental Quality Meter 850070 และทำการเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตทางลำต้น โดยการสุ่มวัดความสูงต้นข้าว (โคนต้นถึงปลายยอดข้าว) ทุก ๆ 1 สัปดาห์ หลังปักดำ จำนวน 5 กออีกด้วย

หลังจากการเพาะปลูกสิ้นสุดได้ดำเนินการเก็บตัวอย่างดินทั้งหมดแล้วนำไปเตรียมตัวอย่างดินด้วยวิธีการดั่งรายละเอียดที่ระบุไว้ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดิน ในส่วนของตัวอย่างต้นข้าวนั้นได้ทำการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปอบให้แห้ง จากนั้นแยกส่วนที่เป็นเมล็ดข้าวออกแล้วนำไปอบแห้งจนได้น้ำหนักคงที่เพื่อนำไปการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมล็ดข้าว ได้แก่ 1) รูปร่างและขนาดของเมล็ดข้าว 2) ผลผลิตข้าว และ 3) ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว ในลำดับต่อไป

3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

การศึกษานี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ดังสรุปในตารางที่ 8 โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินจากแต่ละพื้นที่ศึกษา ได้ดำเนินการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ (Tripletations)

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

| คุณสมบัติของดิน | วิธีวิเคราะห์ | เอกสารอ้างอิง |
|---|---|-----------------------------|
| เนื้อดิน | Hydrometer Method | DOA (2010) |
| ความต่างศักย์ ออกซิเดชัน-รีดักชัน | Glass-electrode Method ผสมดินและน้ำ อัตราส่วน 1:2.5 แล้ววัดด้วยเครื่อง Oxidation-Reduction Potential (ORP) | Makino et al. (2006) |
| อินทรีย์วัตถุ | Walkley and Black Method | Walkley and Allan (1947) |
| ความเป็นกรด-ด่าง | Glass-electrode Method ผสมดินและน้ำ อัตราส่วน 1:2.5 แล้ววัดด้วยเครื่อง pH meter | Makino et al. (2006) |
| ความสามารถในการ แลกเปลี่ยนประจุบวก | สกัดด้วยสารละลาย 1 N Ammonium Acetate (pH 7.0) | DOA (2010) |
| ความเข้มข้นทั้งหมดของ แคดเมียมและสารหนูใน ดิน | ย่อยตัวอย่างดินด้วย conc. HCl และ conc. HNO ₃ อัตราส่วน 3:1 แล้วให้ความร้อนที่ อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง ควบคุมอุณหภูมิหลอดทดลอง (Heating Block) | Husain et al. (1995) |
| ความเข้มข้นของ แคดเมียมและสารหนูใน สภาพพร้อมใช้ | สกัดด้วย 0.5 M Ethylene Diamine Tetra Acetic Acid (EDTA) | Monterroso et al. (2014) |

3.4.1 เนื้อดิน (Soil Texture)

ดำเนินการหาร้อยละหรือสัดส่วนการผสมของอนุภาคดิน 3 ขนาด ได้แก่ ดินทราย (Sand) ดินทรายแป้ง (Silt) และดินเหนียว (Clay) ด้วยวิธี Hydrometer Method โดยละลายดินในน้ำแล้วเติมสารละลาย Sodium Silicate และนำไปเขย่าให้ดินเกิดการแตกตัว จากนั้นถ่ายสารละลายดินลงในกระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 1 ลิตร เติมน้ำให้เต็ม เขย่าขึ้น-ลงเป็นเวลา 2-3 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 40 นาที หลังจากนั้นจึงวัดความหนาแน่นของดินด้วย Hydrometer เพื่อให้ทราบปริมาณของ Silt และ Clay และเมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง จึงทำการวัดความหนาแน่นของดินอีกครั้งเพื่อให้ทราบปริมาณ Sand แล้วจึงทำการคำนวณหาค่าร้อยละหรือสัดส่วนของอนุภาคดินทั้ง 3 ชนิด แล้วจึงทำการจำแนกเนื้อดินต่อไป (DOA, 2010)

3.4.2 ความเป็นกรด-ด่างของดิน (Soil pH) และความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Potential: ORP)

สำหรับการตรวจวัดความเป็นกรด-ด่างของดิน และความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันนั้น ได้ดำเนินการวิเคราะห์ โดยผสมดินและน้ำในอัตราส่วน 1:2.5 กล่าวคือ ผสมดิน 20 กรัม และน้ำปราศจากไอออน 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วคนตัวอย่างดินและน้ำให้เข้ากัน จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็ว 75 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้อนุภาคดินตกตะกอน เป็นเวลา 30-60 นาที แล้วจึงวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน และความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ด้วยเครื่อง pH meter และ ORP meter ตามลำดับ (Makino et al., 2006)

3.4.3 อินทรีย์วัตถุในดิน (Organic Matter: OM)

ดำเนินการวิเคราะห์ด้วยวิธี Walkley and Black Method โดยชั่งตัวอย่างดิน 1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลาย Potassium Dichromate ($K_2Cr_2O_7$) 10 มิลลิลิตร และกรด conc. H_2SO_4 15 มิลลิลิตร แล้วจึงเขย่าตัวอย่างดินและสารละลายให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน 75 มิลลิลิตร และหยด Ferriin Indicator 3-4 หยด ลงในสารละลายตัวอย่างแล้วทำการไทเทรต $K_2Cr_2O_7$ ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาด้วยสารละลาย Ammonium Ferrous Sulphate ($(NH_4)_2FeSO_4 \cdot 6H_2O$) จนกระทั่งสีของสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง แล้วจึงคำนวณหาปริมาณอินทรีย์คาร์บอน

(Organic Carbon: OC) และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Walkley and Allan, 1947) ดังรายละเอียดที่แสดงในสมการที่ 4 และสมการที่ 5

$$OC (\%) = [(B - S) \times N \times 3 \times 100] / 1,000 \times Wt. \quad (\text{สมการ 4})$$

$$OM (\%) = [(B - S) \times N \times 3 \times 100 \times 100 \times 100] / 1,000 \times Wt. \times 58 \times 77 \quad (\text{สมการ 5})$$

โดยที่

| | | |
|-----|-----|--|
| B | คือ | ปริมาตรของ $(NH_4)_2FeSO_4 \cdot 6H_2O$ ที่ใช้ไทเทรตกับ Blank (มิลลิลิตร) |
| S | คือ | ปริมาตรของ $(NH_4)_2FeSO_4 \cdot 6H_2O$ ที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่างดิน (มิลลิลิตร) |
| N | คือ | ปริมาตรความเข้มข้นของ $(NH_4)_2FeSO_4 \cdot 6H_2O$ (N) |
| Wt. | คือ | น้ำหนักตัวอย่างดิน (กรัม) |

3.4.4 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity: CEC)

ดำเนินการวิเคราะห์โดยการชั่งตัวอย่างดิน 5 กรัม ใส่ในกระดาษกรองเบอร์ 42 ที่รองด้วยกรวยกรอง (Funnel) และขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask) ขนาด 125 มิลลิลิตร แล้วทำการสกัดตัวอย่างดินโดยการชะ (Leaching) ด้วยสารละลาย 1 N Ammonium Acetate (pH 7.0) ครั้งละ 25 มิลลิลิตร เป็นจำนวน 4 ครั้ง แล้วนำสารละลายที่ได้จากการชะละลายตัวอย่างดินไปวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้โดยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (Kikuchi et al., 2008) และหาปริมาณโซเดียมและโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้โดยเครื่อง Flame Atomic Absorption Spectrophotometer (FAAS) จากนั้นชะตัวอย่างดินต่อด้วยสารละลาย 0.2 N Ammonium Chloride (pH 7.0) ครั้งละ 25 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง แล้วเทสารละลายทิ้งไป แล้วจึงทำการชะตัวอย่างดินต่อด้วยสารละลาย 40% Ethanol ครั้งละ 25 มิลลิลิตร จำนวน 4 ครั้ง แล้วเทสารละลายทิ้งไป แล้วจึงทำการชะตัวอย่างดินต่อด้วยสารละลาย 10% Sodium Chloride (NaCl) ครั้งละ 25 มิลลิลิตร จำนวน 4 ครั้ง ลงในขวดปรับปริมาตร (Volumetric Flask) 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรสุดท้ายของสารละลายด้วย 10% Sodium Chloride (NaCl) เขย่าสารละลายให้เข้ากัน หลังจากนั้นจึงปิเปตสารละลาย 20 มิลลิลิตร และสารละลาย 10% Sodium Chloride (NaCl) 5 มิลลิลิตร ลงในหลอดกลั่น แล้วนำไปกลั่นด้วยเครื่องกลั่น หลังจากนั้นแยกสารละลายที่ได้จากเครื่องกลั่นด้วย 2% Boric Acid 10 มิลลิลิตร ที่อยู่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร พร้อมกับหยดสารละลาย Mixed Indicator 3-4 หยด แล้วกลั่นต่อเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการกลั่นไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน 0.01 N

Sulfuric Acid (H_2SO_4) จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู แล้วจึงคำนวณหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (DOA, 2010) ดังรายละเอียดที่แสดงในสมการที่ 6

$$CEC \text{ (cmol/kg)} = N \times (S-D) \times V \times 100 / V_{\text{Aliquot}} \times Wt. \quad (\text{สมการ 6})$$

โดยที่

| | | |
|----------------------|-----|---|
| N | คือ | ความเข้มข้นของ H_2SO_4 (N) |
| S | คือ | ปริมาตรของ H_2SO_4 ที่ใช้ไทเทรตกับสารละลาย 10% NaCl ที่ได้จากการชะตัวอย่างดิน (มิลลิลิตร) |
| D | คือ | ปริมาตรของ H_2SO_4 ที่ใช้ไทเทรตกับสารละลาย 10% NaCl ที่ใช้เป็น Blank (มิลลิลิตร) |
| V | คือ | ปริมาตร 10% NaCl ทั้งหมดที่ได้จากการชะตัวอย่างดิน (มิลลิลิตร) |
| V_{Aliquot} | คือ | ปริมาตรสารละลาย 10% NaCl ที่ได้จากการชะที่นำมาไทเทรต (มิลลิลิตร) |
| Wt. | คือ | น้ำหนักตัวอย่างดิน (กรัม) |

3.4.5 ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนู (Total Cadmium and Arsenic Concentration)

ดำเนินการวิเคราะห์โดยการชั่งตัวอย่างดิน 0.5 กรัม ใส่ในหลอดทดลอง ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วเติมกรด conc. HCl และกรด conc. HNO_3 ในอัตราส่วน 3:1 แล้วตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูดควันที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Overnight Pre-digestion) จากนั้นนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิหลอดทดลอง (Heating Block) ที่อุณหภูมิประมาณ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (Husain et al., 1995) แล้วจึงทิ้งให้เย็น หลังจากนั้นจึงกรองสารละลายกรดผสมด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 โดยใช้กรวยกรอง และปรับปริมาตรสุดท้ายด้วยน้ำปราศจากไอออน จนได้ปริมาตรสารละลาย 50 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร (Volumetric Flask) แล้วจึงนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)

3.4.6 ความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ (Bioavailable Cadmium and Arsenic Concentrations)

ดำเนินการวิเคราะห์โดยการชั่งตัวอย่างดิน 2.5 กรัม ใส่ในหลอดทดลองขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วสกัดตัวอย่างดินโดยใช้ กรดเอทิลีนไดอะมีนเตตราอะซิติก (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid : EDTA) ความเข้มข้น 0.05 M ปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 220 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วกรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 โดยใช้กรวยกรอง และปรับปริมาตรสุดท้ายด้วยน้ำปราศจากไอออน จนได้ปริมาตรสารละลาย 50 มิลลิลิตร ด้วยขวดปรับปริมาตร (Volumetric Flask) (Monterroso et al., 2014) แล้วจึงนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูด้วยเครื่อง ICP-OES

3.5 การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว

ตัวอย่างเมล็ดข้าวทั้งหมดที่แยกออกจากส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวได้ถูกนำไปตากให้แห้ง หลังจากนั้นนำเมล็ดข้าวไปสี โดยใช้เครื่องสีข้าวอัตโนมัติ Purify Degree รุ่น HD38888 (รูปที่ 15) เพื่อแยกเปลือก รำ และคัพภะ ออกจากเนื้อเมล็ดข้าวให้ได้ข้าวสารที่มีปริมาณข้าวเต็มเมล็ดมากที่สุด โดยกำหนดระดับการสีตามมาตรฐานของประเทศได้หวั่น โดยคิดจากเปอร์เซ็นต์ข้าวสารหลังการขัดสีที่อยู่ในเกณฑ์ปกติ คือ ร้อยละ 88 ดังแสดงในสมการที่ 7 (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550) หลังจากนั้น ตัวอย่างข้าวทั้งหมดจะถูกบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 420 Mesh เพื่อให้ได้ตัวอย่างข้าวที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับขนาดข้าวที่ผ่านกระบวนการเคี้ยว (Kong and Singh, 2008) และสารมาตรฐาน Standard Reference Material 1568a (Rice Flour) ของข้าว แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้น้ำหนักที่คงที่ แล้วจึงเก็บตัวอย่างข้าวใส่หลอดทดลอง แล้วเก็บในตู้ปราศจากความชื้นเพื่อการวิเคราะห์ในลำดับต่อไป

$$\text{ระดับการขัดสี} = (\text{น้ำหนักข้าวสาร} \times 100) / \text{น้ำหนักของข้าวเปลือก} \quad (\text{สมการ 7})$$



รูปที่ 15 เครื่องสืข้าวอัตโนมัติ

สำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว ได้ดำเนินการโดยชั่งตัวอย่างข้าว 0.1 กรัม ลงในหลอดทดลอง ขนาด 15 มิลลิลิตร แล้วเติมกรด conc. HNO_3 1 มิลลิลิตร แล้วจึงตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูดควันที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นกรองสารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรองประเภท Syringe Filter 0.45 ไมโครเมตร (μm) แล้วปรับปริมาตรสุดท้ายของสารละลายให้เป็น 10 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน (Phan et al., 2013) แล้วจึงนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

3.6 การควบคุมคุณภาพของการย่อยและตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในดินและเมล็ดข้าว

การควบคุมคุณภาพในการย่อยตัวอย่างดินและข้าวเพื่อการวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูได้ดำเนินการย่อยสารมาตรฐานของดินและข้าว ซึ่งได้แก่ Standard Reference Material 1944 (New York/New Jersey Waterway Sediment) และ Standard Reference Material 1568a (Rice Flour) ตามลำดับ ด้วยกระบวนการเดียวกันกับการย่อยตัวอย่างดินและข้าวเป็นจำนวน 2 ซ้ำ เพื่อตรวจสอบปริมาณร้อยละคืนกลับ (% Recovery) ของวิธีย่อยตัวอย่าง โดยยอมรับค่าร้อยละคืนกลับของการย่อยตัวอย่างที่ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 15\%$ ของค่าความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่มีอยู่ในสารละลายมาตรฐาน (Chanpiwat et al., 2018)

ส่วนการควบคุมความแม่นยำและความเที่ยงตรงของเครื่องมือวิเคราะห์ AAS และ ICP-OES ได้ใช้สารละลายมาตรฐาน Standard Reference Material 1643e (Trace Elements in Water) ที่ทราบค่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในการทดสอบ โดยได้ดำเนินการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานด้วยกระบวนการเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง และยอมรับค่าความแม่นยำและความเที่ยงตรงของเครื่องมือที่ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 15\%$ ของค่าความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่มีอยู่ในสารละลายมาตรฐานดังกล่าว (Chanpiwat et al., 2018)

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การศึกษานี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์หา 1) ค่าทางสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ประกอบด้วย ค่าต่ำสุด (Minimum) ค่าสูงสุด (Maximum) ค่าเฉลี่ย (Average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Error) 2) ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของการเจริญเติบโตทางลำต้นของข้าวและปริมาณผลผลิตข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกที่ต่างกัน 3) ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของการสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าวในแต่ละพื้นที่ศึกษา ด้วยวิธีการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกที่ต่างกัน โดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี Paired-Samples T Test และ Multivariate ANOVA และ 4) วิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis : PCA) ในการจัดกลุ่มปัจจัยแวดล้อม ทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน และการเปลี่ยนแปลงปัจจัยแวดล้อม (ความเป็นกรด-ด่าง และความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน) ระหว่างการเพาะปลูกข้าวที่ส่งผลต่อการสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี PCA นี้ ดำเนินการโดยการจัดกลุ่มตัวแปรที่มีจำนวนมาก ๆ ให้มารวมไว้ในองค์ประกอบที่มีจำนวนเพียงไม่กี่ตัว แล้วใช้การหมุนแกนแบบองค์ประกอบ (Factor Rotation) เพื่อให้ค่า Factor Loading ของตัวแปรมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงจนกระทั่งทราบว่าตัวแปรนั้นอยู่ใน Factor ไต ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้วิธีการหมุนแกนแบบ Varimax Rotation ซึ่งเป็นการหมุนแกนโดยเน้นการเปลี่ยนสดมภ์ (Column) ให้ง่ายขึ้น วิธีนี้เป็นวิธีการหมุนแกนโดยให้กำลังสองของน้ำหนักองค์ประกอบแต่ละสดมภ์ในเมทริกซ์ที่มีค่าสูงสุด ซึ่งวิธีนี้จะได้องค์ประกอบของข้อมูลที่มีโครงสร้างง่ายและได้องค์ประกอบเฉพาะ (Specific Factor) ซึ่งทำให้การแปลความหมายขององค์ประกอบสะดวกขึ้น การวิเคราะห์ทางสถิติทั้งหมดนี้ ได้ดำเนินการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Statistical Package for the Social Science (SPSS) และยอมรับค่านัยสำคัญทางสถิติที่ p-value เท่ากับ 0.05

บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลการควบคุมคุณภาพของการย่อยและตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในดินและเมล็ดข้าว

การตรวจสอบความแม่นยำและความเที่ยงตรงของเครื่องมือวิเคราะห์ Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) และ Inductively Couple Plasma Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) ได้ดำเนินการโดยใช้ สารละลายมาตรฐาน Standard Reference Material 1643e (Trace Elements in Water) และควบคุมคุณภาพในการย่อยตัวอย่างดินและข้าวเพื่อการวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนู โดยใช้สารมาตรฐาน Standard Reference Material 1944 (New York/New Jersey Waterway Sediment) และ Standard Reference Material 1568a (Rice Flour) ที่ทราบค่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในการทดสอบตามลำดับ ผลการตรวจสอบคุณภาพของความแม่นยำและความเที่ยงตรงของเครื่องมือวิเคราะห์นั้น พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 105.5 ถึง 107.9 สำหรับเครื่องมือวิเคราะห์ AAS และร้อยละ 95.4 ถึง 114.4 สำหรับเครื่องมือวิเคราะห์ ICP-OES และ ตามลำดับ (ตารางที่ 9) ในส่วนของปริมาณร้อยละคืนกลับ (Recovery rate) ของวิธีย่อยตัวอย่างดินและข้าว นั้น พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 88.4 ถึง 111.3 (ตารางที่ 10) ทั้งนี้ พบว่าค่าร้อยละคืนกลับของเครื่องมือวิเคราะห์ AAS และ ICP-OES และวิธีการย่อยตัวอย่างดินและข้าว นั้น มีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ที่ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 15\%$ ของค่าความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่มีอยู่ในสารละลายมาตรฐานดังกล่าว

ตารางที่ 9 ค่าความแม่นยำและความเที่ยงตรงของเครื่องมือวิเคราะห์

| Element | Certified values ($\mu\text{g L}^{-1}$) | Experiment values ($\mu\text{g L}^{-1}$) | | Recovery rate (%) | |
|---------|--|---|------|----------------------|-------|
| | | ICP-OES | AAS | ICP-OES | AAS |
| Cd | 2.18 | 2.08 | 2.30 | 95.4 | 105.5 |
| As | 20.1 | 23.0 | 21.7 | 114.4 | 107.9 |

ตารางที่ 10 ค่าร้อยละคืนกลับ (Recovery Rate) ของวิธีการย่อยตัวอย่างดินและข้าว

| SRM | Element | Certified values (mg kg ⁻¹) | Experiment values (mg kg ⁻¹) | Recovery rate (%) |
|--------------------|---------|--|---|----------------------|
| 1944 ¹ | Cd | 8.8 | 7.8 | 88.4 |
| | As | 18.9 | 18.5 | 97.9 |
| 1568a ² | Cd | 0.022 | 0.019 | 86.7 |
| | As | 0.285 | 0.317 | 111.3 |

หมายเหตุ: ¹ Standard Reference Material 1944 (New York/New Jersey Waterway Sediment)

² Standard Reference Material 1568a (Rice Flour)

4.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน

ตัวอย่างดินนาข้าวที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เก็บจากพื้นที่นาข้าวในตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ที่กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (2559) รายงานการปนเปื้อนแคดเมียมในเมล็ดข้าวสูงเกินเกณฑ์มาตรฐานที่ FAO/WHO กำหนด (0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จำนวน 3 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ A พื้นที่ B และพื้นที่ C (รูปที่ 10) ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินนาข้าว แสดงดังในตารางที่ 11 พบว่าสัดส่วนของอนุภาคดินทราย (Sand) มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 21.6 ถึง 28.6 อนุภาคดินทรายแป้ง (Silt) มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 26.2 ถึง 35.2 และอนุภาคดินเหนียว (Clay) มีค่าอยู่ในช่วง 37.2 ถึง 45.2 เมื่อจำแนกลักษณะเนื้อดินตามมาตรฐานคุณภาพดินที่กำหนดโดยกรมวิชาการเกษตร (Department of Agriculture: DOA) พบว่าตัวอย่างดินนาข้าวที่เก็บจากพื้นที่ A สามารถจำแนกได้เป็นดินร่วนปนดินเหนียว (Clay Loam) ส่วนตัวอย่างดินนาข้าวที่เก็บจากพื้นที่ B และ C สามารถจำแนกได้เป็นดินเหนียว (Clay) ซึ่งเป็นดินที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำ ดูดซับ และแลกเปลี่ยนธาตุอาหารได้ดี เหมาะสำหรับการปลูกข้าว (DOA, 2010) พื้นที่ทั้ง 3 พื้นที่นี้ถูกใช้ประโยชน์ในการปลูกข้าวในฤดูทำนา (เดือนสิงหาคม ถึง เดือนธันวาคม) และถูกใช้ประโยชน์เพื่อการเพาะปลูกพืชหมุนเวียน เช่น ข้าวโพด นอกฤดูการทำนา ผลการศึกษาความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินนาข้าวในแต่ละพื้นที่ พบว่าสัดส่วนของอนุภาคดิน

เหนียวในตัวอย่างดินนาข้าวที่เก็บจากพื้นที่ B มีค่าสูงกว่าพื้นที่ C และพื้นที่ A อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าสูงกว่าประมาณ 1.0 และ 1.2 เท่า ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินนาข้าวในแต่ละพื้นที่เมื่ออ้างอิงคุณสมบัติของดินเพื่อการเพาะปลูกตามกรมวิชาการเกษตร (2553) (ภาคผนวก ก, ตารางที่ ก-1 ถึง ก-6) พบว่าค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Eh) ของตัวอย่างดินนาข้าวมีค่าอยู่ในช่วงปานกลาง (206 ถึง 246 มิลลิโวลต์) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของตัวอย่างดินนาข้าวมีความเป็นกรดปานกลาง (มีค่าอยู่ในช่วง 5.77 ถึง 6.07) และมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (CEC) อยู่ในระดับสูง (17.1 ถึง 22.6 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ (OM) ในดินอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง (ร้อยละ 2.08 ถึง 3.50) ซึ่งจัดในช่วงของดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สำหรับการทำการเกษตรของประเทศไทย (มากกว่าร้อยละ 2) ซึ่งกำหนดโดยกรมวิชาการเกษตร (2554) เมื่อพิจารณาปริมาณธาตุอาหารในดินตามเกณฑ์ของกรมวิชาการเกษตร (2553) พบว่าตัวอย่างดินนาข้าวมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในระดับต่ำ (ร้อยละ 0.104 ถึง 0.175) ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในระดับปานกลางถึงสูง (16 ถึง 27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินในระดับต่ำถึงเหมาะสม (104 ถึง 161 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดินนาข้าวในการศึกษานี้กับการศึกษาก่อนหน้าในพื้นที่ตำบลแม่ตาว พบว่าความเป็นกรด-ด่างของดินมีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับผลการศึกษาก่อนหน้าของ Kosolsaksakul et al. (2014) ซึ่งเก็บตัวอย่างดินนาข้าวมาศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของดิน และรายงานค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 6.8 ถึง 7.7 ค่าปริมาณอินทรีย์วัตถุ ประมาณร้อยละ 1.1 ถึง 3.7 และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน มีค่า 19 เซนติโมลต่อกิโลกรัม อีกทั้งยังพบว่าตัวอย่างดินนาข้าวในการศึกษานี้มีค่าอินทรีย์วัตถุ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Akkajit and Tongcumpou (2010) ที่พบว่าดินนาข้าวจากพื้นที่ตำบลแม่ตาว มีปริมาณสารอินทรีย์ อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 0.52 ถึง 4.16

ในส่วนของความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียม (Total Cd) ในตัวอย่างดินนาข้าว นั้นพบว่ามีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1.10 ถึง 71.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 11) เมื่อพิจารณาระดับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินนาข้าวในแต่ละพื้นที่ พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินนาข้าวที่เก็บจากพื้นที่ C มีค่าสูงกว่าพื้นที่ A และพื้นที่ B อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ประมาณ 45.0 และ 64.6 เท่า ตามลำดับ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าภูมิหลังของ

แคดเมียมในดินทั่วไปในธรรมชาติของประเทศไทย (1.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งรายงานโดยสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2552) พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินนาข้าวที่เก็บจากพื้นที่ C มีค่าสูงกว่าค่าภูมิหลังของแคดเมียมในดินทั่วไปในธรรมชาติของประเทศไทย ถึง 41.8 เท่า อีกทั้งยังมีค่าสูงเกินมาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย (ต้องไม่เกิน 37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ที่กำหนดโดยคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2547) ถึง 1.92 เท่า ส่วนความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินนาข้าวของพื้นที่ A และ B นั้น มีค่าใกล้เคียงกับค่าภูมิหลังของแคดเมียมในดินทั่วไป ส่วนระดับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมสูงสุดในการศึกษานี้ (71.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในดินจากพื้นที่ C) พบว่ามีความสอดคล้องกับรายงานผลการศึกษาก่อนหน้าของ Akkajit (2015) ที่พบความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมเท่ากับ 81.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อพิจารณาจำแนกระดับการปนเปื้อนแคดเมียมตามกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (2558) ซึ่งได้แบ่งระดับการปนเปื้อนออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 1) การปนเปื้อนในระดับต่ำ (< 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) 2) การปนเปื้อนแคดเมียมระดับปานกลาง (3 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และ 3) การปนเปื้อนแคดเมียมระดับสูง (>30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) พบว่าดินนาข้าวในพื้นที่ C (71.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จัดเป็นดินที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมในระดับสูง ส่วนดินนาข้าวของพื้นที่ A และ B นั้น พบว่ามีการปนเปื้อนของแคดเมียมในระดับต่ำ (ตารางที่ 11)

ในส่วนความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนู (Total As) ในตัวอย่างดินนาข้าว นั้น พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 23.3 ถึง 45.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 11) เมื่อพิจารณาระดับความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในตัวอย่างดินนาข้าวในแต่ละพื้นที่ พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในตัวอย่างดินนาข้าวที่เก็บจากพื้นที่ B มีค่าสูงกว่าพื้นที่ A และพื้นที่ C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ประมาณ 1.9 และ 1.2 เท่า ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าภูมิหลังของสารหนูในดินทั่วไปในธรรมชาติของประเทศไทย (26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งรายงานโดยสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2552) พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในดินนาข้าวที่เก็บจากพื้นที่ B และพื้นที่ C มีค่าสูงกว่าค่าภูมิหลังของสารหนูในดินทั่วไปในธรรมชาติของประเทศไทย ถึง 1.75 และ 1.39 เท่า ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในดินนาข้าวในทุกพื้นที่ที่มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย (ต้องไม่เกิน 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ที่กำหนดโดยคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2547) ถึง 5.97, 11.7 และ 9.31 เท่า ตามลำดับ

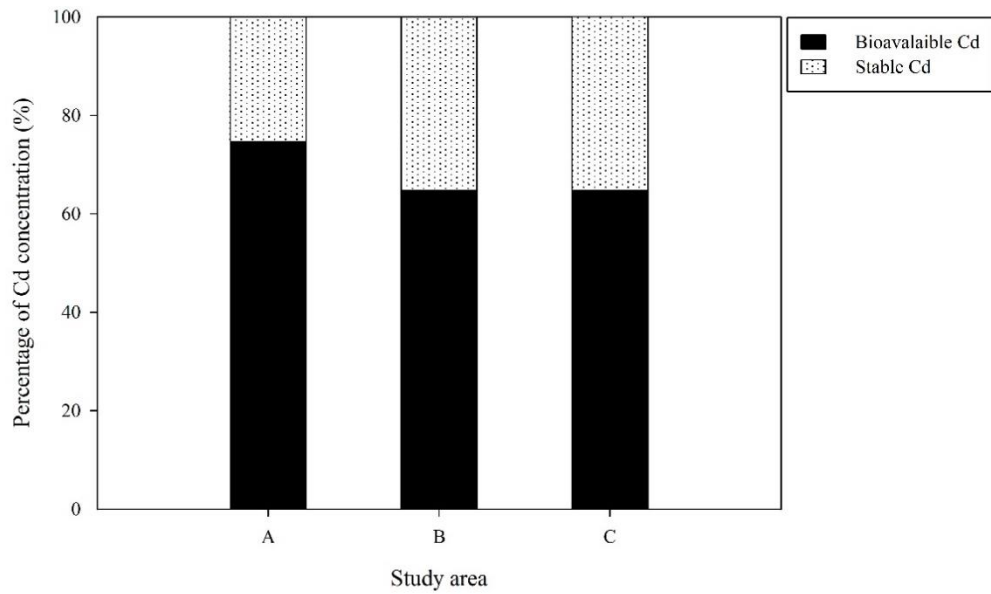
ผลการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ของ ตัวอย่างดินนาข้าว ด้วยวิธีสกัดแบบเดี่ยวโดยใช้กรดเอทิลีนไดแอมีนเตตราอาซิติก (Ethylene Diamine Tetraacetic acid: EDTA) พบว่าปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในตัวอย่างดินนาข้าวที่เก็บจากพื้นที่ A พื้นที่ B และพื้นที่ C มีค่าเท่ากับ 1.18, 0.71 และ 46.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 74.6, 64.7 และ 64.8 ของความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียม ตามลำดับ (รูปที่ 16) เมื่อเปรียบเทียบร้อยละความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในตัวอย่างดินนาข้าวในแต่ละพื้นที่ พบว่าตัวอย่างดินนาข้าวที่เก็บจากพื้นที่ A มีค่าสูงกว่าพื้นที่ C และพื้นที่ B ประมาณ 39.1 และ 64.9 เท่า ตามลำดับ ในส่วนของปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในตัวอย่างดินนาข้าวที่เก็บจากพื้นที่ A พื้นที่ B และพื้นที่ C พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.7, 0.9 และ 0.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 2.9, 2.0 และ 1.9 ของความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนู ตามลำดับ (รูปที่ 17) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบร้อยละความเข้มข้นของสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในตัวอย่างดินนาข้าวในแต่ละพื้นที่ พบว่าตัวอย่างดินนาข้าวที่เก็บจากพื้นที่ A มีค่าสูงกว่าพื้นที่ B และพื้นที่ C ประมาณ 1.4 และ 1.3 เท่า ตามลำดับ

นอกจากนั้นผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปริมาณสูงสุดของระดับความเข้มข้นของแคดเมียม (ร้อยละ 74.6) และสารหนู (ร้อยละ 2.9) ที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้นั้นสามารถพบในตัวอย่างดินนาข้าวที่เก็บจากพื้นที่ A ซึ่งมีลักษณะเนื้อดินเป็นดินร่วนปนดินเหนียว (Clay Loam) เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วอนุภาคดินร่วนและดินทรายจะมีประจุที่ผิวอนุภาคเป็นลบน้อยจึงมีความสามารถจับกับประจุบวกได้ดี ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้หรืออยู่ในสภาพของสารละลายในดิน ซึ่งมีประจุบวก นั้นมีค่าสูง (Kibria et al., 2007) ด้วยเหตุนี้ ตัวอย่างดินจากพื้นที่ A ซึ่งมีค่าร้อยละของตัวอย่างดินเหนียวต่ำที่สุด และมีค่าร้อยละของดินทรายสูงที่สุดนั้นจึงมีความสามารถในการจับกับสารละลายของแคดเมียมและสารหนูในดินได้น้อยส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้มีค่าสูงที่สุดนั่นเอง

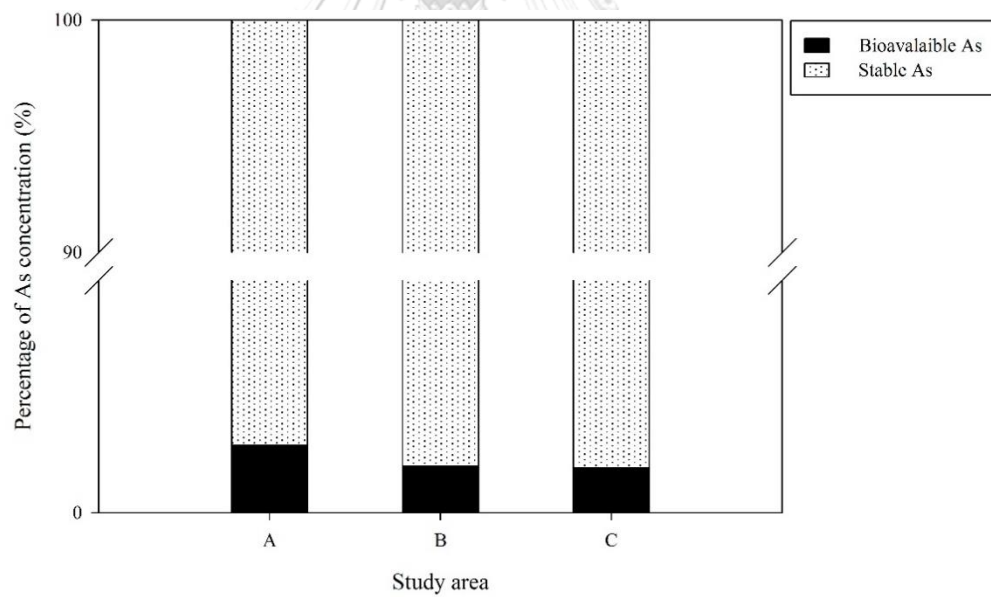
ตารางที่ 11 คุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพและเคมีของดินนาข้าวในพื้นที่ตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก [ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n=3]

| คุณสมบัติดิน | หน่วย | พื้นที่ศึกษา | | |
|--|-----------------------|------------------|------------------|-----------------|
| | | A | B | C |
| เนื้อดิน (Soil Type) | | ดินร่วนเหนียว | ดินเหนียว | ดินเหนียว |
| ดินทราย (Sand) | % | 28.6 | 28.6 | 21.6 |
| ดินทรายแป้ง (Silt) | % | 34.2 | 26.2 | 35.2 |
| ดินเหนียว (Clay) | % | 37.2 | 45.2 | 43.2 |
| ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Eh) | mV | 246 \pm 3.54 | 229 \pm 5.87 | 206 \pm 2.82 |
| ความเป็นกรด-ด่าง (pH) | | 5.77 \pm 0.15 | 5.97 \pm 0.04 | 6.07 \pm 0.01 |
| ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) | cmol kg ⁻¹ | 17.1 | 22.6 | 18.3 |
| อินทรีย์วัตถุ (OM) | % | 2.51 | 2.08 | 3.50 |
| ไนโตรเจน (Total Kjeldahl N) | % | 0.126 | 0.104 | 0.175 |
| ฟอสฟอรัส (Available P) | mg kg ⁻¹ | 22 | 16 | 27 |
| โพแทสเซียม (Exchangeable K) | mg kg ⁻¹ | 104 | 136 | 161 |
| ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียม (Total Cd) | mg kg ⁻¹ | 1.58 \pm 0.030 | 1.10 \pm 0.008 | 71.1 \pm 4.72 |
| ความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนู (Total As) | mg kg ⁻¹ | 23.3 \pm 2.59 | 45.5 \pm 4.91 | 36.3 \pm 2.82 |

หมายเหตุ: A, B, C คือ พื้นที่ศึกษาในการวิจัยนี้ (รูปที่ 9)



รูปที่ 16 ร้อยละความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้เทียบกับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินนาข้าว



รูปที่ 17 ร้อยละความเข้มข้นของสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้เทียบกับความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในตัวอย่างดินนาข้าว

4.3 ผลการตรวจวัดการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงปัจจัยแวดล้อมระหว่างการเพาะปลูกข้าว

4.3.1 การเจริญเติบโตทางลำต้นของข้าว

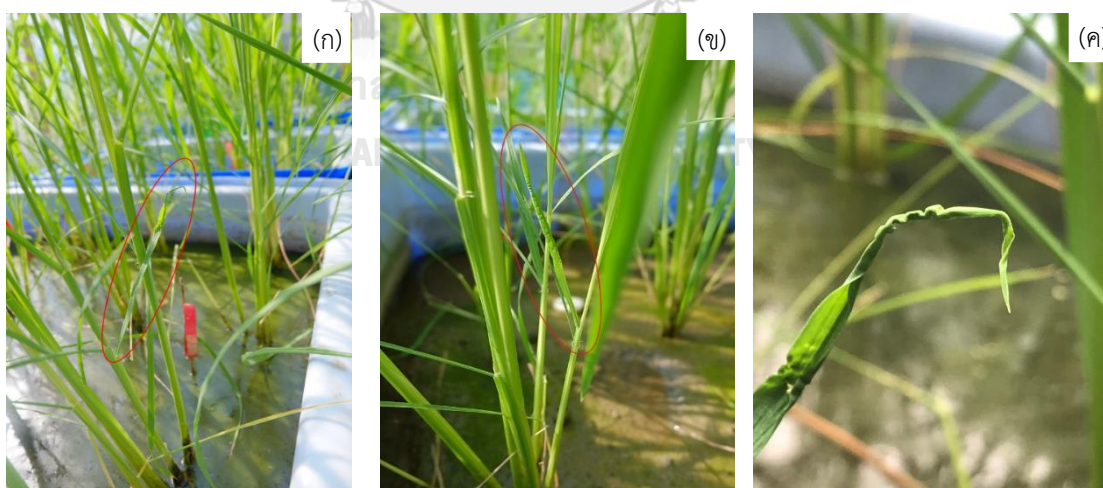
การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองปลูกข้าวหอมมะลิ 105 (พันธุ์ข้าวไวแสง) ในช่วงเดือน ตุลาคม ถึง เดือนมกราคม ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาเดียวกันกับฤดูทำนาของพื้นที่ศึกษา ผลการตรวจวัด สภาพแวดล้อมของการเพาะปลูก พบว่าความเข้มแสงเฉลี่ยในโรงเรือนตลอดระยะเวลาเพาะปลูก มีค่า อยู่ในช่วงตั้งแต่ 13,522 ถึง 19,824 ลักซ์ (Lux) และอุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนตลอดระยะเวลา เพาะปลูก มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 30.2 ถึง 47.0 องศาเซลเซียส นอกจากนี้แล้วยังได้ทำการเก็บข้อมูล อัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงของต้นข้าวในช่วงอายุ 30, 45, 60 และ 90 วัน โดยวัดความสูงจาก โคนต้นถึงปลายยอดข้าว ในต้นข้าวที่ถูกเพาะปลูกแบบดั้งเดิมเช่นเดียวกันกับที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษา ปฏิบัติ (Conventional) และในต้นข้าวที่ถูกเพาะปลูกแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment) ทั้งใน 3 พื้นที่ศึกษา (พื้นที่ A, B และ C) ผลการตรวจวัดการเจริญเติบโตทางความสูงของต้นข้าว (ตารางที่ 12) พบว่าความสูงของต้นข้าวในทุกชุดการทดลองมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเพาะปลูก เพิ่มขึ้น ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าข้าวที่ปลูกในชุดการทดลอง Conventional-B และ Treatment-B มีอัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงของต้นข้าวสูงที่สุด เท่ากับ 116.2 และ 115.8 เซนติเมตร ตามลำดับ รองลงมา คือ ชุดการทดลองที่ Conventional-C และ Treatment-C มีค่า เท่ากับ 112.8 และ 111.6 เซนติเมตร ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากตัวอย่างดินในพื้นที่ดังกล่าว (พื้นที่ B และ C) มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียว (Clay) ซึ่งเป็นเนื้อดินที่ข้าวมักเจริญเติบโตได้ดี มีความสามารถในการอุ้มน้ำ ดูดยิด และแลกเปลี่ยนธาตุอาหารได้ดี (DOA, 2010)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของต้นข้าวที่อายุ 30, 45, 60 และ 90 วันหลัง เพาะปลูก กับปริมาณความชื้นชั้นทั้งหมดของแคตเมียมและสารหนูในดินก่อนการเพาะปลูกข้าว แสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นชั้นทั้งหมดของแคตเมียมและสารหนูในดินไม่มีผลต่อการเจริญเติบโต ด้านความสูงของข้าว นอกจากนี้ยังพบว่าต้นข้าวที่ปลูกในชุดการทดลอง Conventional และ Treatment ในพื้นที่ C ซึ่งมีระดับความชื้นชั้นทั้งหมดของแคตเมียมสูงที่สุดในการศึกษานี้ (71.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) นั้น มีการแสดงอาการผิดปกติทางใบ มีลักษณะปลายใบม่วงงอผิดปกติ จน สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า (รูปที่ 18) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Aina et al. (2007) ที่ รายงานว่าหากดินนาข้าวมีการปนเปื้อนของแคตเมียมในปริมาณมากจะส่งผลกระทบต่อ

โครงสร้างพื้นฐานของข้าว เช่น ใบเหลือง และใบม้วนงอผิดปกติ เป็นต้น และยังมีรายงานการศึกษา ก่อนหน้าที่พบว่าเมื่อพืชที่ได้รับแคดเมียมในปริมาณมากจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการสังเคราะห์ แสงของข้าวและปริมาณรงควัตถุ (Pigment) ในข้าวลดลง ทั้งนี้ยังอาจทำให้เอนไซม์ (Enzyme) ของ ข้าวถูกทำลายอีกด้วย (Zia-ur-Rehman et al., 2015) อย่างไรก็ตาม ผลการสังเกตด้วยตาเปล่าของใบ ข้าวในการศึกษานี้ ไม่พบการแสดงอาการใบเหลืองของต้นข้าวแต่อย่างใด

ตารางที่ 12 ความสูงของต้นข้าว (เซนติเมตร) ในระยะการเจริญเติบโตต่าง ๆ

| ชุดการทดลอง | ระยะการเจริญเติบโตของต้นข้าวหลังปักดำ | | | |
|-----------------|---------------------------------------|----------|-----------|-----------|
| | 30 วัน | 45 วัน | 60 วัน | 90 วัน |
| Conventional-A | 68.4±4.3 | 92.8±2.2 | 113.0±4.9 | 113.8±5.1 |
| Treatment -A | 50.2±3.4 | 68.6±2.4 | 101.8±5.9 | 102.4±5.3 |
| Conventional -B | 66.8±1.1 | 90.0±6.5 | 115.6±6.4 | 116.2±6.6 |
| Treatment -B | 57.4±1.8 | 75.2±6.7 | 112.6±4.8 | 115.8±4.1 |
| Conventional -C | 72.0±2.0 | 95.8±2.8 | 112.4±3.2 | 112.8±4.6 |
| Treatment -C | 65.8±5.4 | 90.4±6.0 | 108.0±3.6 | 111.6±4.6 |



รูปที่ 18 ลักษณะความผิดปกติทางใบของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียมในระดับสูงในชุดการทดลอง (ก) Conventional และ (ข) Treatment และ (ค) ภาพขยายแสดงการม้วนงอที่ผิดปกติของใบข้าว

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าว

ผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าว 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Conventional) และการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment) พบว่าค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในช่วง 4 สัปดาห์ หลังการปักดำ (Tillering) ของดินในพื้นที่ A ในชุดการทดลอง Conventional-A มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -11.8 ถึง 78.7 มิลลิโวลต์ และชุดการทดลอง Treatment-A มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 28.4 ถึง 55.7 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในช่วงการระบายน้ำกลางฤดูกาล (Midseason Drainage) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 21.8 ถึง 84.6 และ 60.2 ถึง 77.7 มิลลิโวลต์ ในช่วงการจัดการน้ำในระหว่างการเพาะปลูกข้าว (Water Management Period) นั้น ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินจะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปแบบการของการจัดการน้ำในแต่ละรูปแบบ โดยพบว่ามีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -17.6 ถึง 44.2 และ -37.8 ถึง 13.8 มิลลิโวลต์ สำหรับชุดการทดลอง Conventional-A และ Treatment-A ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับช่วงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ที่รายงานโดย Patrick and Mahapatra (1968) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง -100 ถึง 100 มิลลิโวลต์ ซึ่งจัดอยู่ในสภาวะการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) อีกทั้งยังพบว่าค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินนั้นลดลงอย่างมากในสัปดาห์ที่ 7 และ 8 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เราเริ่มดำเนินการจัดการน้ำ หลังจากนั้นค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงสัปดาห์ที่ 12 และ 13 ซึ่งเป็นระยะของการระบายน้ำในแปลงทดลองออกจนแห้งเพื่อเร่งการสุกของเมล็ดข้าว (Harvesting) (รูปที่ 19)

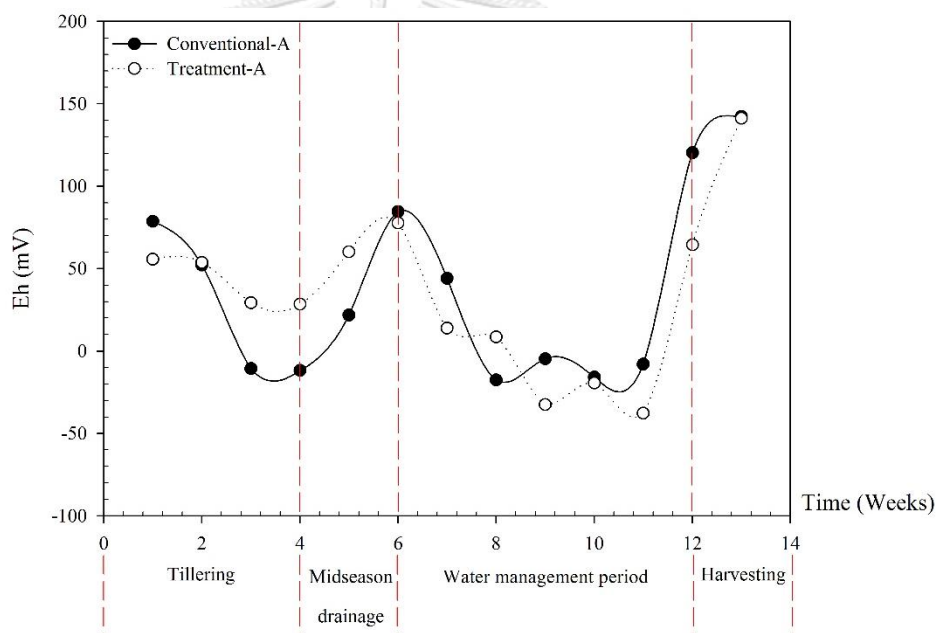
ในส่วนผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่ศึกษา B ชุดการทดลอง Conventional-B ในช่วงของการปักดำ (Tillering) มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 62.3 ถึง 73.6 มิลลิโวลต์ และชุดการทดลอง Treatment-B มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 78.7 ถึง 128.7 มิลลิโวลต์ และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในช่วงการระบายน้ำกลางฤดูกาล (Midseason Drainage) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 66.9 และ 79.2 และ 88.8 ถึง 98.2 มิลลิโวลต์ ในช่วงการจัดการน้ำในระหว่างการเพาะปลูกข้าว (Water Management Period) นั้น ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินในชุดการทดลอง Conventional-B และ Treatment-B มีค่าอยู่ในช่วง -15.8 ถึง 50.6 และ 18.5 ถึง 128.8 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับช่วงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ที่รายงานโดย Patrick and Mahapatra (1968) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง

การเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วงสภาวะรีดักชันถึงรีดักชันปานกลาง (ซึ่งมีค่าตั้งแต่ -100 ถึง 100 และ 100 ถึง 300 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ) อีกทั้งยังพบว่าค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินนั้นลดลงอย่างมากในสัปดาห์ที่ 8 และ 9 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เริ่มดำเนินการจัดการน้ำ หลังจากนั้นค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงสัปดาห์ที่ 12 และ 13 ซึ่งเป็นระยะของการระบายน้ำในแปลงทดลองออกจนแห้งเพื่อเร่งการสุกของเมล็ดข้าว (Harvesting) (รูปที่ 20)

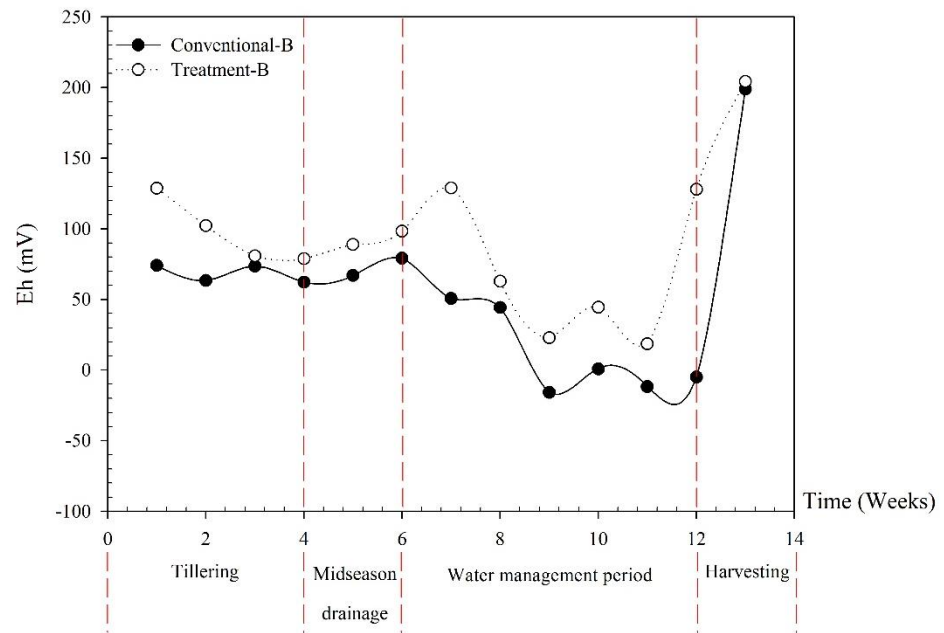
ในส่วนของผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่ศึกษา C นั้น พบว่า ชุดการทดลอง Conventional-C ในช่วงของการปักดำ (Tillering) มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -60.1 ถึง -37.3 มิลลิโวลต์ และชุดการทดลอง Treatment-C มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -57.0 ถึง -40.3 มิลลิโวลต์ และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในช่วงการระบายน้ำกลางฤดูกลาง (Midseason Drainage) อยู่ในช่วงตั้งแต่ -17.5 ถึง -11.0 และ -13.3 ถึง 15.4 มิลลิโวลต์ ในช่วงการจัดการน้ำในระหว่างการเพาะปลูกข้าว (Water Management Period) นั้น ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินในชุดการทดลอง Conventional-C และ Treatment-C มีค่าอยู่ในช่วง -58.7 ถึง -1.10 และ -19.3 ถึง 23.8 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับช่วงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ที่รายงานโดย Patrick and Mahapatra (1968) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง -100 ถึง 100 มิลลิโวลต์ ซึ่งจัดอยู่ในสภาวะการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน อีกทั้งยังพบว่าค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินนั้นลดลงในสัปดาห์ที่ 8 และ 9 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เริ่มดำเนินการจัดการน้ำ หลังจากนั้นค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงสัปดาห์ที่ 12 และ 13 ซึ่งเป็นระยะของการระบายน้ำ ในแปลงทดลองออกจนแห้งเพื่อเร่งการสุกของเมล็ดข้าว (Harvesting) (รูปที่ 21)

ผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าวในทุกชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน คือค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินจะเริ่มลดลงในช่วง 4 สัปดาห์ (สัปดาห์ที่ 1-4) หลังปักดำแล้วเสร็จ (Tillering) และมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในช่วงการระบายน้ำกลางฤดูกลาง (ในสัปดาห์ที่ 5-6) (Midseason Drainage) ส่วนในช่วงสัปดาห์ที่ 7-11 ซึ่งเป็นช่วงของการจัดการน้ำ (Water Management Period) นั้น ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินจะมีค่าแตกต่างกันตามรูปแบบการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูก กล่าวคือ ค่าความต่างศักย์

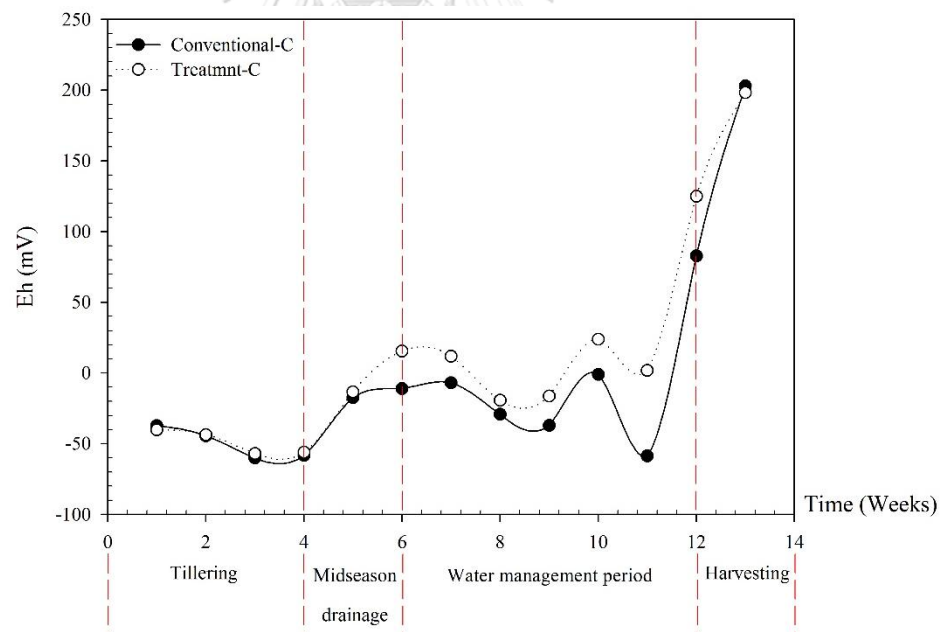
ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินในชุดการทดลองแบบดั้งเดิม (Conventional) ที่มีการขังน้ำตลอดระยะเวลาการเพาะปลูกจะมีค่าต่ำกว่าในชุดการทดลองที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment) ส่วนในช่วงการระบายน้ำในแปลงทดลองออกเพื่อเร่งการสุกของเมล็ดข้าว (Harvesting) หรือในระยะเวลาการปลูกข้าวในสัปดาห์ที่ 12-13 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันจะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าของ Honma et al. (2016) ที่พบว่าค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินที่ทำการตรวจวัดในระหว่างการเพาะปลูกข้าวนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ -200 ถึง -150 มิลลิโวลต์ สำหรับการจัดการน้ำแบบน้ำขังตลอดเวลา (Flooded) และ -150 ถึง 0 มิลลิโวลต์ สำหรับการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง



รูปที่ 19 การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าว
ในพื้นที่ศึกษา A



รูปที่ 20 การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าว
ในพื้นที่ศึกษา B



รูปที่ 21 การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าว
ในพื้นที่ศึกษา C

4.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าว

ผลการศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าว 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Conventional) และการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment) พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของดินในพื้นที่ A ในชุดการทดลอง Conventional-A และ Treatment-A มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 6.48 ถึง 6.97 และ 6.42 ถึง 7.04 ตามลำดับ ในช่วง 4 สัปดาห์ หลังปักดำแล้วเสร็จ (Tillering) เมื่อพิจารณาสภาพความเป็นกรด-ด่างของดินตามเกณฑ์ของกรมวิชาการเกษตร (2553) พบว่ามีค่าความเป็นกรด-ด่างของดินอยู่ในระดับที่ดินเป็นกรดเล็กน้อยถึงระดับเป็นกลาง ในช่วงการระบายน้ำกลางฤดูกลาง (Midseason Drainage) หรือในช่วงสัปดาห์ที่ 5 ถึง 6 ของการเพาะปลูก พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของดินนาข้าวในชุดการทดลอง Conventional-A มีค่าอยู่ในระดับเป็นกลาง (มีค่าอยู่ในช่วง 6.72 ถึง 6.78) และชุดการทดลอง Treatment-A มีค่าอยู่ในระดับเป็นกรดเล็กน้อยถึงระดับเป็นกลาง (มีค่าอยู่ในช่วง 6.50 ถึง 6.71) และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเป็นกรด-ด่างของดินในสัปดาห์ที่ 4 กับช่วงการระบายน้ำกลางฤดูกลาง (สัปดาห์ที่ 5 และสัปดาห์ที่ 6) พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของดินนาข้าวในชุดการทดลอง Conventional-A ลดลงจาก 6.84 เป็น 6.78 และ 6.72 ตามลำดับ ส่วนในชุดการทดลอง Treatment-A มีค่าลดลงจาก 7.04 เป็น 6.71 และ 6.50 ตามลำดับ ในช่วงสัปดาห์ที่ 7 ถึง 11 ซึ่งเป็นช่วงของการจัดการน้ำในระหว่างการเพาะปลูกข้าว (Water Management Period) นั้น พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของดินมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการจัดการน้ำในแต่ละรูปแบบ โดยพบว่ามีค่าความเป็นกรด-ด่างของดินอยู่ในระดับเป็นกรดเล็กน้อยถึงระดับเป็นกลาง มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 6.43 ถึง 6.89 และ 6.35 ถึง 7.04 สำหรับชุดการทดลองที่ Conventional-A และ Treatment-A ตามลำดับ (รูปที่ 22)

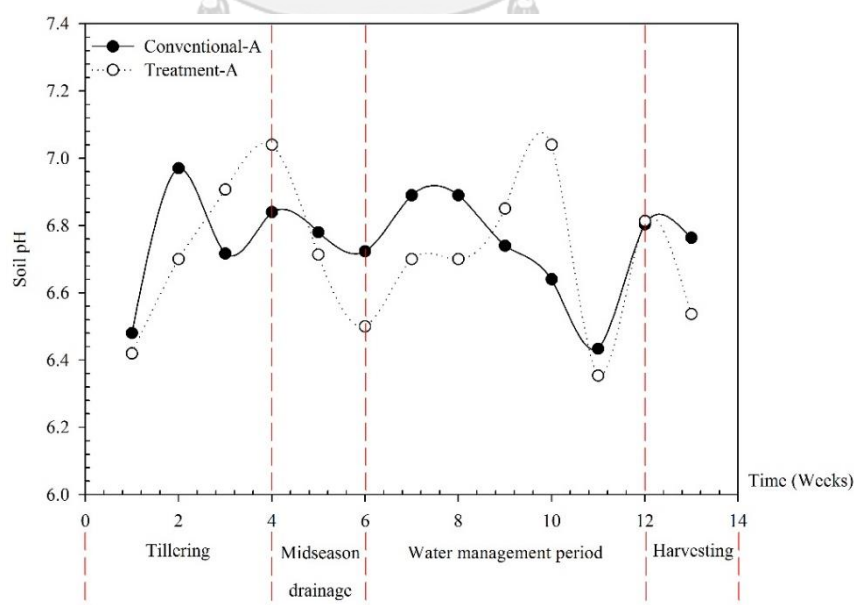
ในส่วนผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่ศึกษา B ในชุดการทดลอง Conventional-B และ Treatment-B พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 6.21 ถึง 7.04 และ 6.21 ถึง 6.90 ตามลำดับ ในช่วง 4 สัปดาห์ หลังปักดำแล้วเสร็จ (Tillering) เมื่อพิจารณาสภาพความเป็นกรด-ด่างของดินตามเกณฑ์ของกรมวิชาการเกษตร (2553) พบว่ามีค่าความเป็นกรด-ด่างของดินอยู่ในระดับเป็นกรดเล็กน้อยถึงระดับเป็นกลาง ในช่วงการระบายน้ำกลางฤดูกลาง (Midseason Drainage) หรือในช่วงสัปดาห์ที่ 5 ถึง 6 ของการเพาะปลูก พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง

ของดินนาข้าวในชุดการทดลอง Conventional-B มีค่าอยู่ในระดับเป็นกลาง (มีค่าอยู่ในช่วง 6.91 ถึง 7.21) และชุดการทดลอง Treatment-B มีค่าอยู่ในระดับเป็นกรดเล็กน้อยถึงระดับเป็นกลาง (มีค่าอยู่ในช่วง 6.23 ถึง 6.88) และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเป็นกรด-ต่างของดินในสัปดาห์ที่ 4 กับช่วงการระบายน้ำกลางฤดูการ (สัปดาห์ที่ 5 และสัปดาห์ที่ 6) พบว่าค่าความเป็นกรด-ต่างของดินนาข้าวในชุดการทดลอง Conventional-B เพิ่มขึ้นในสัปดาห์ที่ 5 จาก 7.04 เป็น 7.21 และลดลงในสัปดาห์ที่ 6 เป็น 6.91 ตามลำดับ ส่วนในชุดการทดลอง Treatment-B มีค่าลดลงจาก 6.90 เป็น 6.88 และ 6.23 ตามลำดับ ในช่วงสัปดาห์ที่ 7 ถึง 11 ซึ่งเป็นช่วงของการจัดการน้ำในระหว่างการเพาะปลูกข้าว (Water Management Period) นั้น พบว่าค่าความเป็นกรด-ต่างของดินมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการจัดการน้ำในแต่ละรูปแบบ โดยพบว่ามีค่าความเป็นกรด-ต่างของดินอยู่ในระดับเป็นกรดเล็กน้อยถึงระดับเป็นกลาง มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 6.22 ถึง 6.91 และ 6.33 ถึง 6.85 สำหรับชุดการทดลอง Conventional-B และ Treatment-B ตามลำดับ (รูปที่ 23)

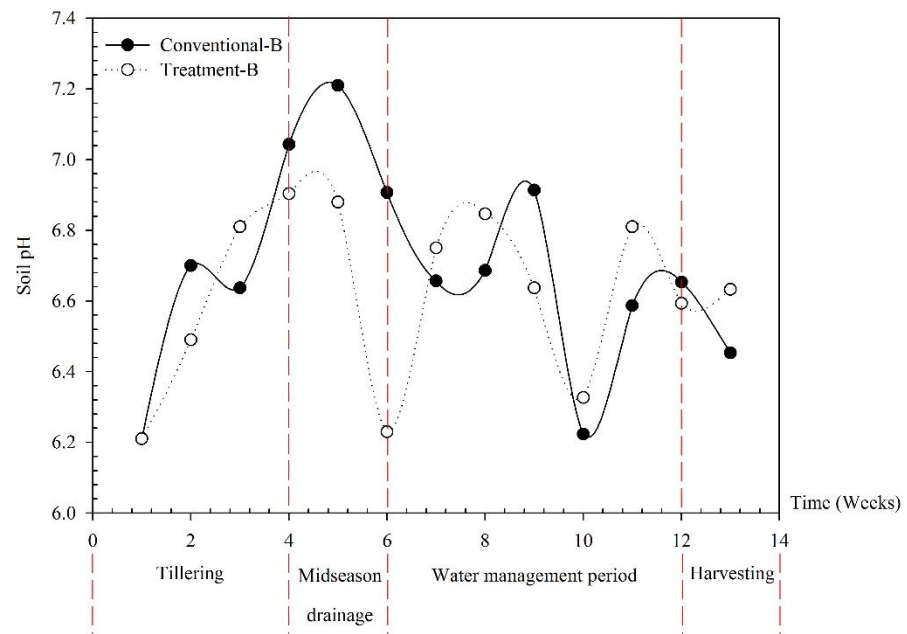
สำหรับผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ต่างของดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่ศึกษา C ในชุดการทดลอง Conventional-C และ Treatment-C มีค่าอยู่ใน 6.18 ถึง 7.15 และ 6.60 ถึง 7.10 ตามลำดับ ในช่วง 4 สัปดาห์ หลังปักดำแล้วเสร็จ (Tillering) เมื่อพิจารณาสภาพความเป็นกรด-ต่างของดินตามเกณฑ์ของกรมวิชาการเกษตร (2553) พบว่ามีค่าความเป็นกรด-ต่างของดินอยู่ในระดับที่ดินเป็นกรดเล็กน้อยถึงระดับเป็นกลาง ในช่วงการระบายน้ำกลางฤดูการ (Midseason Drainage) หรือในช่วงสัปดาห์ที่ 5 ถึง 6 ของการเพาะปลูก พบว่าค่าความเป็นกรด-ต่างของดินนาข้าวในชุดการทดลองที่ Conventional-C และ Treatment-C มีค่าอยู่ในระดับเป็นกลาง (มีค่าอยู่ในช่วง 6.57 ถึง 6.86 และ 6.96 ถึง 7.11 ตามลำดับ) และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเป็นกรด-ต่างของดินในสัปดาห์ที่ 4 กับช่วงการระบายน้ำกลางฤดูการ (สัปดาห์ที่ 5 และสัปดาห์ที่ 6) พบว่าค่าความเป็นกรด-ต่างของดินนาข้าวในชุดการทดลอง Conventional-C นั้นมีค่าลดลงจาก 7.15 เป็น 6.86 และ 6.57 ตามลำดับ ส่วนในชุดการทดลอง Treatment-C มีค่าลดลงจาก 7.10 เป็น 6.96 และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงสัปดาห์ที่ 6 เป็น 7.11 ตามลำดับ ในช่วงสัปดาห์ที่ 7 ถึง 11 ซึ่งเป็นช่วงของการจัดการน้ำในระหว่างการเพาะปลูกข้าว (Water Management Period) นั้น พบว่าค่าความเป็นกรด-ต่างของดินมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการจัดการน้ำในแต่ละรูปแบบ โดยพบว่ามีค่าความเป็นกรด-ต่างของดินอยู่ในระดับเป็นกรดเล็กน้อยถึงระดับเป็นกลาง มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 6.22

ถึง 7.05 และ 6.31 ถึง 7.01 สำหรับชุดการทดลองที่ Conventional-C และ Treatment-C ตามลำดับ (รูปที่ 24)

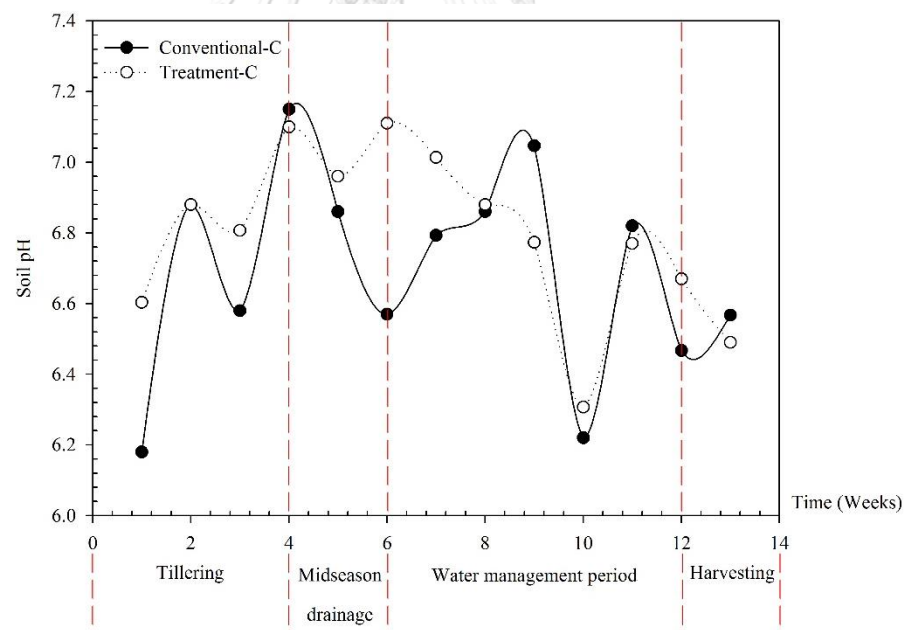
ผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของดินระหว่างการเพาะปลูกข้าวใน ทุกชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของดินมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินจะเริ่มเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 4 สัปดาห์ หลังปักดำแล้วเสร็จ (Tillering) และมีค่าลดลงในช่วงการระบายน้ำกลางฤดูกลาง (Midseason Drainage) ส่วนในช่วงสัปดาห์ที่ 7-11 ซึ่งมีการจัดการน้ำ (Water Management Period) นั้น ค่าความเป็นกรด-ด่างจะมีค่าแตกต่างกันตามรูปแบบการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูก ส่วนในช่วงของการระบายน้ำในแปลงทดลองออกเพื่อเร่งการสุกของเมล็ดข้าว (Harvesting) (สัปดาห์ที่ 12-13) นั้น พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของดินในชุดการทดลองแบบดั้งเดิม (Conventional) ที่มีการขังน้ำตลอดระยะเวลาการเพาะปลูกจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Honma et al. (2016) ที่พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของดินที่ทำการตรวจวัดในระหว่างการเพาะปลูกข้าว นั้นจะมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 6.30 ถึง 6.50 สำหรับการจัดการน้ำแบบน้ำขังตลอดเวลา (Flooded) และการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง อีกทั้งยังพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของดินมีค่าลดลงอย่างมากในช่วงระบายน้ำกลางฤดูกลาง (Midseason Drainage) อีกด้วย



รูปที่ 22 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างในดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่ศึกษา A



รูปที่ 23 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างในดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่ศึกษา B

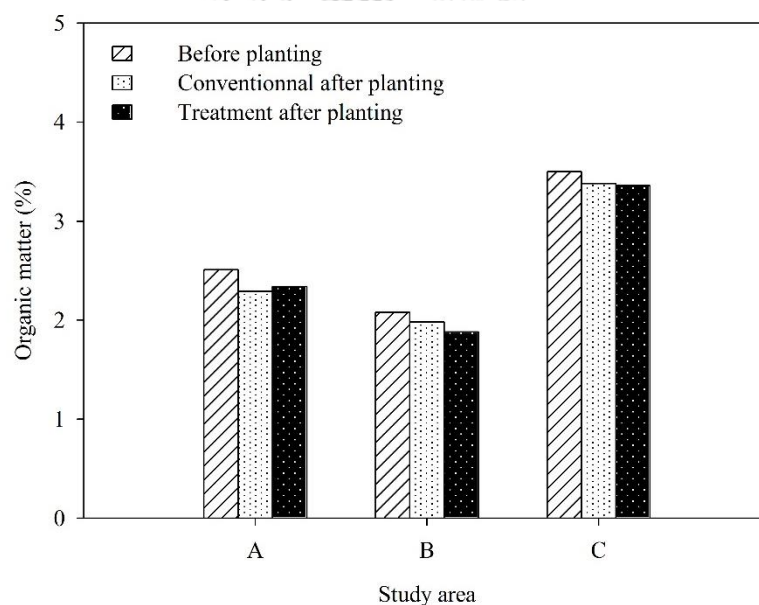


รูปที่ 24 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างในดินในระหว่างการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่ศึกษา C

4.4 ผลของรูปแบบการจัดการน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของดินหลังการเพาะปลูก

4.4.1 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินก่อนและหลังการเพาะปลูกข้าว

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินก่อนการเพาะปลูกข้าว (Before Cultivation) และหลังการเพาะปลูกข้าว (After Cultivation) พบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุในตัวอย่างดินในพื้นที่ A พื้นที่ B และพื้นที่ C ก่อนการเพาะปลูกข้าว มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.51, 2.08 และ 3.50 ตามลำดับ ส่วนดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.29, 1.98 และ 3.38 ตามลำดับ และชุดการทดลอง Treatment มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.34, 1.88 และ 3.36 ตามลำดับ (รูปที่ 25) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณอินทรีย์วัตถุในตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าวกับดินหลังการเพาะปลูกข้าวของทั้ง 3 พื้นที่ศึกษา ในชุดการทดลอง Conventional และ Treatment พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และพบว่าดินหลังการเพาะปลูกข้าว มักจะมีปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อยกว่าดินก่อนการเพาะปลูกข้าว ประมาณ 1 ถึง 1.1 เท่า



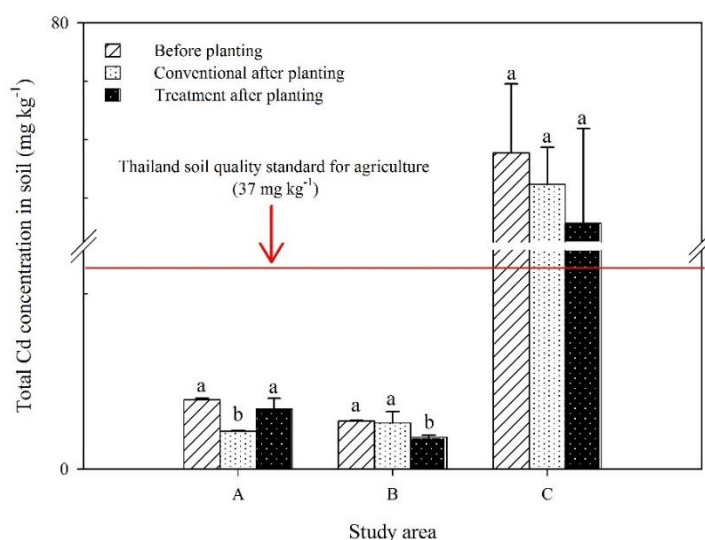
รูปที่ 25 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในตัวอย่างดินก่อนและหลังการเพาะปลูกข้าว

4.4.2 ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดินก่อนและหลังการเพาะปลูกข้าว

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในดินก่อนการเพาะปลูกข้าว (Before Cultivation) และหลังการเพาะปลูกข้าว (After Cultivation) พบว่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินในพื้นที่ A พื้นที่ B และพื้นที่ C ก่อนการเพาะปลูกข้าว มีค่าเท่ากับ 1.58, 1.10 และ 71.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional นั้นมีความเข้มข้นของแคดเมียม เท่ากับ 0.87, 1.05 และ 68.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และชุดการทดลอง Treatment มีค่าเท่ากับ 1.37, 0.72 และ 66.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าวกับดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional-A และ Treatment-A พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลองที่ Conventional-A มีค่าลดลงจากดินก่อนการเพาะปลูกข้าว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็นร้อยละ 44.9 ส่วนตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Treatment-A มีค่าลดลงจากดินก่อนการเพาะปลูก คิดเป็นร้อยละ 13.3 ในส่วนของความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าวกับดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional-B และ Treatment-B พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional-B มีค่าลดลงจากดินก่อนการเพาะปลูกข้าว คิดเป็นร้อยละ 4.55 และตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Treatment-B มีค่าลดลงจากดินก่อนการเพาะปลูกข้าว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็นร้อยละ 34.6 ส่วนความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าวกับดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional-C และ Treatment-C นั้น พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าว มีค่าลดลงจากดินก่อนการเพาะปลูก คิดเป็นร้อยละ 3.1 และ 6.8 ตามลำดับ (รูปที่ 26)

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional กับ Treatment ในพื้นที่ศึกษา 3 พื้นที่ พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าวแบบ Treatment ในพื้นที่ B และพื้นที่ C นั้น มีค่าต่ำกว่าการเพาะปลูกข้าวแบบ Conventional คิดเป็นร้อยละ 31.4

และ 3.8 ตามลำดับ ในขณะที่พื้นที่ A นั้น ค่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าวแบบ Conventional มีค่าสูงกว่าการเพาะปลูกข้าวแบบ Treatment คิดเป็นร้อยละ 36.5

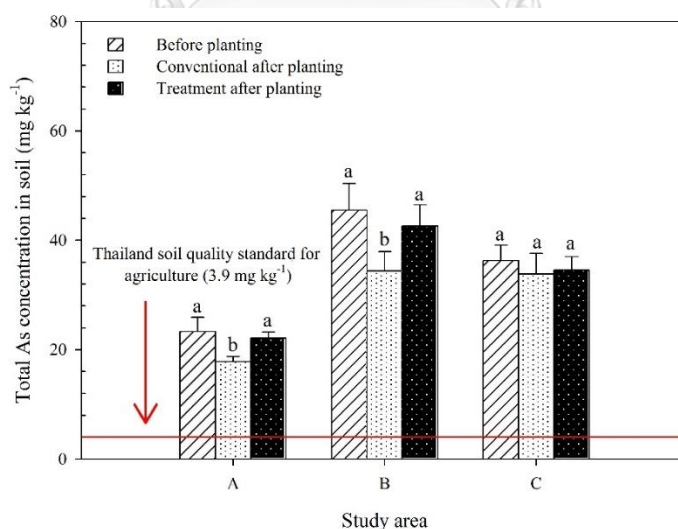


รูปที่ 26 ปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในดินก่อนและหลังการเพาะปลูกข้าว
หมายเหตุ: a และ b คือ ค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p < 0.05$)

ในส่วนปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าว (Before Cultivation) และหลังการเพาะปลูกข้าว (After Cultivation) นั้น พบว่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในตัวอย่างดินนาข้าวของพื้นที่ A พื้นที่ B และพื้นที่ C ก่อนการเพาะปลูกข้าว มีค่าเท่ากับ 23.3, 45.5 และ 36.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional มีค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนู เท่ากับ 17.8, 34.4 และ 36.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และชุดการทดลอง Treatment มีค่าเท่ากับ 22.1, 42.6 และ 34.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าวกับดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional-A และ Treatment-A พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional-A มีค่าลดลงจากดินก่อนการเพาะปลูกข้าว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็นร้อยละ 23.6 และตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Treatment-A มีค่าลดลงจากดินก่อนการเพาะปลูก คิดเป็นร้อยละ 5.2 ในส่วนของความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนู

ในตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าวกับดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional-B และ Treatment-B พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional-B นั้นมีค่าลดลงจากดินก่อนการเพาะปลูกข้าว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คิดเป็นร้อยละ 23.4 ส่วนตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Treatment-B มีค่าลดลงจากดินก่อนการเพาะปลูกข้าว คิดเป็นร้อยละ 34.6 สำหรับความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าวกับดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional-C และ Treatment-C พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าว มีค่าลดลงจากดินก่อนการเพาะปลูก คิดเป็นร้อยละ 6.90 และ 4.7 ตามลำดับ (รูปที่ 27)

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลองที่ Conventional กับ Treatment ในพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 พื้นที่ (A, B และ C) พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าวแบบ Conventional ในพื้นที่ศึกษาทั้งหมด มีค่าต่ำกว่าการเพาะปลูกข้าวแบบ Treatment คิดเป็นร้อยละ 19.5, 19.3 และ 36.5 ตามลำดับ



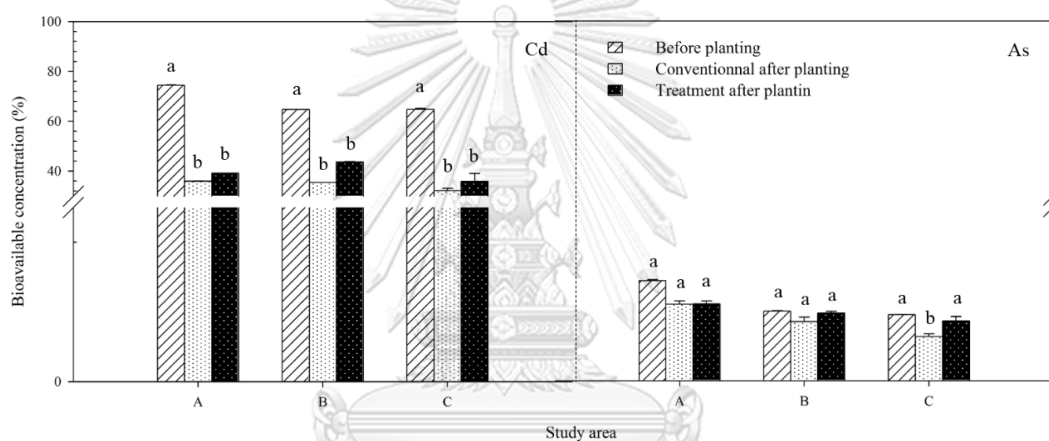
รูปที่ 27 ปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในดินก่อนและหลังการเพาะปลูกข้าว
หมายเหตุ: a และ b คือ ค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p < 0.05$)

4.4.3 ร้อยละความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในดินก่อนและหลังการเพาะปลูกข้าว

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในดินก่อนการเพาะปลูกข้าว (Before Cultivation) และหลังการเพาะปลูกข้าว (After Cultivation) พบว่าปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในตัวอย่างดินในพื้นที่ A พื้นที่ B และพื้นที่ C ก่อนการเพาะปลูกข้าว มีค่าเท่ากับ 1.18, 0.71 และ 46.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional มีค่าเท่ากับ 0.57, 0.39 และ 22.86 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 36.0, 35.5 และ 32.2 ของความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียม ส่วนชุดการทดลอง Treatment มีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ เท่ากับ 0.62, 0.48 และ 25.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 39.1, 43.7 และ 35.9 ของความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียม (รูปที่ 28) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าวกับดินหลังการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่ศึกษา ทั้ง 3 พื้นที่ ในชุดการทดลอง Conventional และ Treatment พบว่าปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าวทุกชุดการทดลองมีค่าน้อยกว่าดินก่อนการเพาะปลูกข้าว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ประมาณ 2.1, 1.8 และ 2 เท่า ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลอง Conventional และ 1.9, 1.5 และ 1.8 เท่า ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลอง Treatment

ในส่วนของปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าว (Before Cultivation) และหลังการเพาะปลูกข้าว (After Cultivation) นั้น พบว่าปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในตัวอย่างดินนาข้าวที่เก็บจากพื้นที่ A พื้นที่ B และพื้นที่ C พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.7, 0.9 และ 0.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional มีค่าเท่ากับ 0.57, 0.39 และ 22.86 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 2.2, 1.7 และ 1.3 ของความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนู ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลอง Treatment มีค่าความเข้มข้นของสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ เท่ากับ 0.51, 0.89 และ 0.62 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 2.2, 1.9 และ 1.7 ของความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนู (รูปที่ 28) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่

อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าวกับดินหลังการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่ศึกษา ทั้ง 3 พื้นที่ ทั้งในชุดการทดลอง Conventional และ Treatment พบว่าปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในตัวอย่างดินหลังการเพาะปลูกข้าวในชุดการทดลอง Conventional ในพื้นที่ A และพื้นที่ B และชุดการทดลอง Treatment ในพื้นที่ A และพื้นที่ B และพื้นที่ C มีค่าน้อยกว่าดินก่อนการเพาะปลูกข้าว ประมาณ 1.4 และ 1.2 เท่า ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลอง Conventional และ 1.4, 1.0 และ 1.1 เท่า ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลอง Treatment ในส่วนปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในชุดการทดลอง Conventional ในพื้นที่ C พบว่ามีค่าน้อยกว่าดินก่อนการเพาะปลูกข้าว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ประมาณ 1.5 เท่า



รูปที่ 28 ร้อยละความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้เทียบกับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในตัวอย่างดินนาข้าวหลังการเพาะปลูก
หมายเหตุ: a และ b คือ ค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p < 0.05$)

4.5 ผลผลิตข้าวและความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว

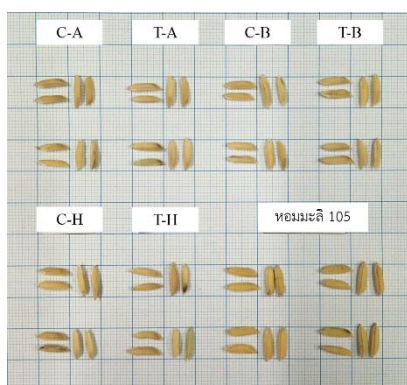
4.5.1 คุณภาพของเมล็ดข้าวทางกายภาพและผลผลิตข้าว

1) คุณภาพเมล็ดข้าวทางกายภาพ

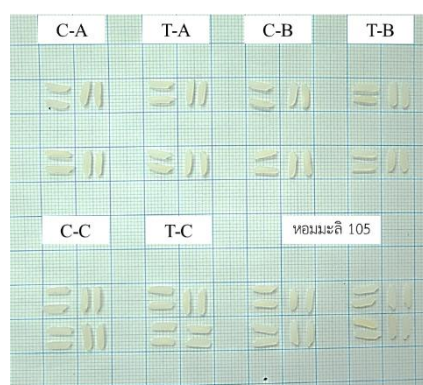
ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือก อันประกอบไปด้วย ความยาว ความกว้าง ความหนา และน้ำหนักของเมล็ดข้าวเปลือก 100 เมล็ด พบว่าตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกในทุกชุดการทดลองมีคุณภาพทางกายภาพของเมล็ดอยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงกัน และไม่มี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในผลผลิตจากการเพาะปลูกด้วยการจัดการน้ำทั้ง 2 รูปแบบในทุกพื้นที่ศึกษา เมื่อพิจารณาตามลักษณะของเมล็ดข้าวเปลือก พบว่าเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Conventional) มีความยาว ความกว้าง ความหนา และน้ำหนัก 100 เมล็ด อยู่ในช่วงตั้งแต่ 9.60 ถึง 10.17, 2.06 ถึง 2.40, 1.59 ถึง 1.64 มิลลิเมตร และ 2.24 ถึง 2.35 กรัม ตามลำดับ และเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 9.40 ถึง 10.21, 2.23 ถึง 2.39, 1.58 ถึง 1.68 มิลลิเมตร และ 2.09 ถึง 2.27 กรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 13) เนื่องจากประเทศไทยนั้นยังมิได้มีการกำหนดระดับและเกณฑ์คุณภาพของลักษณะเมล็ดข้าวเปลือก ดังนั้นขนาดและรูปร่างของเมล็ดข้าวเปลือกในการศึกษานี้จึงถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์คุณภาพของเมล็ดข้าวในการศึกษาก่อนหน้าของ Boonhong and Wutthichai (2016) ซึ่งพบว่ามีความอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันกับผลการศึกษาในครั้งนี้ โดยค่าเฉลี่ยความยาว ความกว้าง ความหนา และน้ำหนัก 100 เมล็ดของข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีค่าเท่ากับ 9.9, 2.3, 1.8 มิลลิเมตร และ 2.77 กรัม ตามลำดับ

นอกจากนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับช่วงขนาดและรูปร่างเฉลี่ยของเมล็ดข้าวเปลือกพันธุ์อินดิกา (Indica) ในสหรัฐอเมริกา ที่รายงานโดย Webb (1991) พบว่าเมล็ดข้าวมีลักษณะเมล็ดเรียวยาว มีสีเปลือกเป็นสีฟางถึงสีน้ำตาลอ่อน ซึ่งอยู่ในเกณฑ์พันธุ์ข้าวที่มีคุณภาพดี เมื่อนำไปสีจะได้ร้อยละของแกลบน้อย และเป็นไปตามลักษณะประจำพันธุ์ของข้าวที่นิยมปลูกในเขตร้อนของทวีปเอเชีย ยกตัวอย่างเช่น ประเทศไทย พม่า และปากีสถาน เป็นต้น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

ในส่วนของการวิเคราะห์คุณภาพของข้าวขาวทางกายภาพนั้น พบว่า ความยาว ความกว้าง ความหนา และน้ำหนัก 100 เมล็ดของข้าวขาวในทุกชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในผลผลิตจากการเพาะปลูกด้วยการจัดการน้ำทั้ง 2 รูปแบบในทุกพื้นที่ศึกษา เมื่อพิจารณาตามลักษณะของเมล็ดข้าวขาวนั้น พบว่าเมล็ดข้าวขาวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Conventional) มีความยาว ความกว้าง และความหนา อยู่ในช่วงตั้งแต่ 6.86 ถึง 6.98, 1.92 ถึง 1.93 และ 1.45 ถึง 1.52 มิลลิเมตร ตามลำดับ และน้ำหนัก 100 เมล็ด มีค่าเท่ากับ 2.06 ถึง 2.13 กรัม ส่วนเมล็ดข้าวขาวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment) มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 6.98 ถึง 7.02, 1.88 ถึง 1.95 และ 1.42 ถึง 1.50 มิลลิเมตร ตามลำดับ และน้ำหนัก 100 เมล็ด มีค่าเท่ากับ 2.01 ถึง 2.08 กรัม เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานข้าวขาวของประเทศไทยที่กำหนดโดยกระทรวงพาณิชย์ (2540) พบว่าความยาวเฉลี่ยของเมล็ดข้าวขาวเต็มเมล็ดในการศึกษานี้ (6.86 ถึง 7.02 มิลลิเมตร) มีความยาวของเมล็ดอยู่ในช่วงที่จัดเป็นข้าวเมล็ดยาวชั้น 1 (มากกว่าหรือเท่ากับ 7.0 มิลลิเมตร) ถึงข้าวเมล็ดยาวชั้น 2 (6.6 ถึง 7.0 มิลลิเมตร) มีอัตราส่วนความยาวเฉลี่ยต่อความกว้างเฉลี่ยของข้าวขาวเต็มเมล็ดที่ไม่มีส่วนหักไม่ต่ำกว่า 3.2 : 1 (รูปที่ 29 และตารางที่ 13) เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของเมล็ดแล้ว พบว่าเมล็ดข้าวขาวในการศึกษานี้จัดอยู่ในประเภทข้าวเมล็ดเรียวยาว มีคุณภาพการขัดสีอยู่ในระดับดี เมล็ดไม่แตกหักง่าย อีกทั้งยังพบว่าตัวอย่างเมล็ดข้าวขาวในการศึกษานี้มีความยาว ความกว้าง และความหนาของเมล็ดข้าวขาวอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Boonhong and Wutthichai (2016) ที่รายงานค่าเฉลี่ยความยาว ความกว้าง และความหนาของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 เท่ากับ 7.1, 2.0 และ 1.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 29 ลักษณะทางกายภาพของ (ก) เมล็ดข้าวเปลือกและ (ข) ข้าวขาว พันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ

ตารางที่ 13 คุณภาพทางกายภาพของเมล็ดข้าวเปลือกและข้าวขาว พันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105

| ชนิดข้าว | ชุดการทดลอง | ความยาว (มิลลิเมตร) | ความกว้าง (มิลลิเมตร) | ความหนา (มิลลิเมตร) | ยาว/กว้าง (อัตราส่วน) | น้ำหนัก 100 เมล็ด (กรัม) |
|------------|----------------|------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| ข้าวเปลือก | Conventional-A | 10.2±0.50 | 2.08±0.32 | 1.59±0.12 | 4.9 | 2.28±0.11 |
| | Treatment-A | 10.2±0.39 | 2.32±0.24 | 1.68±0.13 | 4.4 | 2.09±0.02 |
| | Conventional-B | 10.2±0.40 | 2.40±0.35 | 1.60±0.09 | 4.2 | 2.35±0.09 |
| | Treatment-B | 10.1±0.53 | 2.39±0.32 | 1.58±0.09 | 4.2 | 2.18±0.03 |
| | Conventional-C | 9.60±0.80 | 2.06±0.31 | 1.64±0.07 | 4.6 | 2.24±0.02 |
| | Treatment-C | 9.40±0.54 | 2.23±0.28 | 1.65±0.12 | 4.2 | 2.27±0.01 |
| ข้าวขาว | Conventional-A | 6.98±0.27 | 1.93±0.08 | 1.50±0.08 | 3.6 | 2.13±0.11 |
| | Treatment-A | 7.02±0.17 | 1.88±0.08 | 1.42±0.06 | 3.7 | 2.02±0.02 |
| | Conventional-B | 6.86±0.35 | 1.91±0.11 | 1.52±0.12 | 3.6 | 2.22±0.10 |
| | Treatment-B | 7.01±0.40 | 1.95±0.11 | 1.48±0.09 | 3.6 | 2.01±0.05 |
| | Conventional-C | 6.93±0.35 | 1.92±0.08 | 1.45±0.08 | 3.6 | 2.06±0.01 |
| | Treatment-C | 6.98±0.35 | 1.89±0.07 | 1.50±0.08 | 3.7 | 2.08±0.01 |

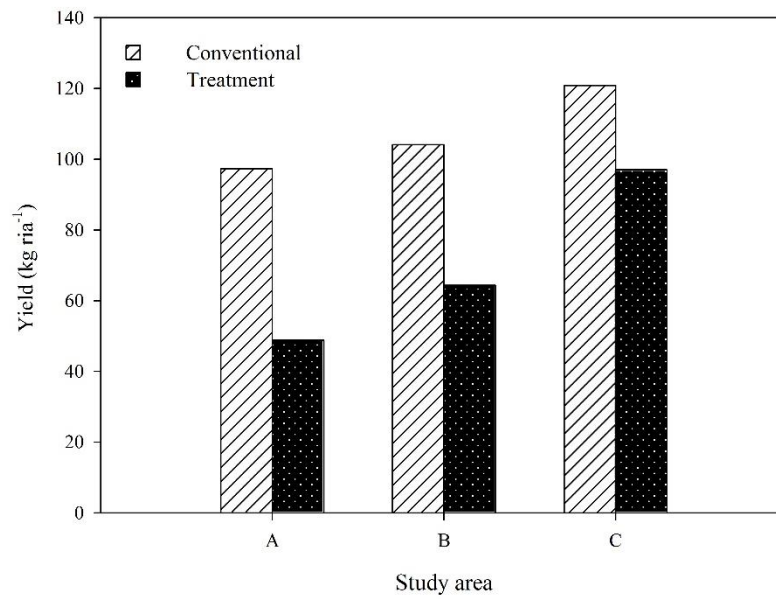
2) ปริมาณผลผลิตข้าว

ในส่วนของการวิเคราะห์ปริมาณผลผลิตข้าวนั้น พบว่าการเพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Conventional) ให้ผลผลิตข้าวในช่วงตั้งแต่ 97.3 ถึง 120.8 กิโลกรัมต่อพื้นที่เพาะปลูก 1 ไร่ ส่วนการเพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment) ให้ผลผลิตข้าวในช่วงตั้งแต่ 48.8 ถึง 97.0 กิโลกรัมต่อพื้นที่เพาะปลูก 1 ไร่ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณผลผลิตข้าวโดยเฉลี่ยของประเทศไทย (483 กิโลกรัมต่อพื้นที่เพาะปลูก 1 ไร่) ที่รายงานโดยสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2555) พบว่าการเพาะปลูกข้าวด้วยวิธีจัดการน้ำทั้ง 2 รูปแบบ ในการศึกษานี้ให้ผลผลิตข้าวน้อยกว่าผลผลิตข้าวโดยเฉลี่ยของประเทศไทย ประมาณ 4 ถึง 5 และ 4.9 ถึง 9.8 เท่า ตามลำดับ ปริมาณผลผลิตข้าวในการศึกษานี้ ซึ่งพบว่ามีความแตกต่างจากปริมาณผลผลิตเฉลี่ยของประเทศไทย อาจเกิดขึ้นเนื่องจากผลกระทบของอุณหภูมิภายในเรือนทดลองที่มีค่าสูงจนไม่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของต้นข้าว ทั้งนี้ได้มีการตรวจวัดอุณหภูมิภายในโรงเรือนทดลองตลอดระยะเวลาการเพาะปลูก (13 สัปดาห์) และพบว่าอุณหภูมิภายในโรงเรือนทดลอง มีค่า

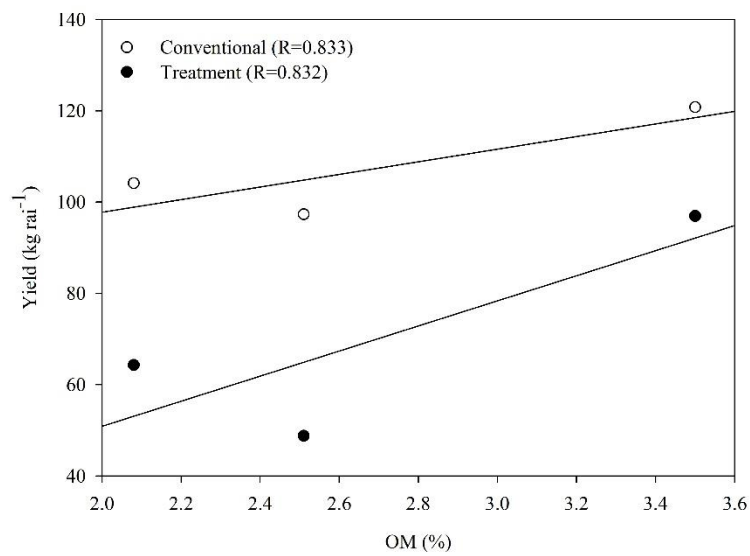
อยู่ในช่วง 30.2 ถึง 47.0 องศาเซลเซียส โดยมีสัปดาห์ของการเพาะปลูกที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 38 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิวิกฤติ) ถึงร้อยละ 76.9 ของระยะเวลาการเพาะปลูกทั้งหมด ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของเบญจวรรณ ฤกษ์เกษม (2561) ซึ่งพบว่าอุณหภูมิที่ต่ำหรือสูงเกินไป (ต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส และสูงกว่า 38 องศาเซลเซียส) นั้นจะมีผลต่อการสร้างดอกอ่อน การผสมเกสร ส่งผลทำให้ดอกข้าวเป็นหมันหรือทำให้เมล็ดข้าวลีบได้

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Conventional) กับปริมาณผลผลิตข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment) ในพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 พื้นที่แล้วพบว่าปริมาณผลผลิตข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Conventional) ให้ผลผลิตข้าวสูงกว่าการเพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment) ประมาณ 2.0, 1.6 และ 1.3 เท่า ในพื้นที่ A, B และ C ตามลำดับ (รูปที่ 30) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าของ Ishikawa et al. (2016) ที่พบว่าข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบดั้งเดิม (Flooded Condition) นั้นมักจะให้ผลผลิตข้าวสูงกว่าการเพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition) ประมาณ 1 ถึง 1.2 เท่า ตามลำดับ

นอกจากนั้นผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ยังพบว่าปริมาณผลผลิตข้าวนั้นไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในตัวอย่างดินนาข้าวก่อนการเพาะปลูก ($p > 0.05$) กล่าวคือ ปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าว นั้นไม่พบว่าส่งผลต่อการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของผลผลิตข้าว ในทางตรงกันข้ามผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปริมาณอินทรีย์วัตถุในตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าว นั้นมีความสัมพันธ์ทางสถิติในเชิงบวกกับปริมาณผลผลิตข้าว กล่าวคือ ปริมาณผลผลิตข้าว นั้นจะมีมากขึ้นหากดินนาข้าวก่อนการเพาะปลูกมีอินทรีย์วัตถุในปริมาณมาก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.833 และ 0.832 สำหรับการเพาะปลูกข้าวแบบ Conventional และ Treatment ตามลำดับ (รูปที่ 31)



รูปที่ 30 แผนภูมิเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตข้าวจากการเพาะปลูกแบบ Conventional และ Treatment



รูปที่ 31 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณอินทรียวัตฤในตัวอย่างดินก่อนการเพาะปลูกข้าว กับปริมาณผลผลิตข้าว

4.5.2 ปริมาณการสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว

1) แคดเมียม (Cadmium)

ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าว พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.11 ถึง 1.91 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับผลการศึกษาก่อนหน้าที่รายงานโดย Chanpiwat et al. (2018) ที่พบว่าระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียม ในตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก มีค่าอยู่ในช่วง 0.03 ถึง 1.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อพิจารณาระดับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวในพื้นที่ A พื้นที่ B และพื้นที่ C ซึ่งเพาะปลูกด้วยวิธี Conventional พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.31, 0.11 และ 0.98 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่เมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธี Treatment นั้น พบว่ามีค่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียม เท่ากับ 0.50, 0.18 และ 1.91 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากผลผลิตในพื้นที่ A, B และ C ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่กำหนดโดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติและองค์การอนามัยโลก (FAO/WHO) (0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) (CODEX, 2014) พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวในพื้นที่ A จากการเพาะปลูกแบบ Conventional และพื้นที่ B จากการเพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำทั้ง 2 รูปแบบ มีค่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวต่ำกว่าค่ามาตรฐานของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่กำหนดโดย FAO/WHO ส่วนความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวในพื้นที่ A จากการเพาะปลูกแบบ Treatment และพื้นที่ C จากการเพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำ 2 รูปแบบนั้น มีค่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานของ FAO/WHO (0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ถึง 1.2, 2.4 และ 4.8 เท่า ตามลำดับ (รูปที่ 32) การพบความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานของ FAO/WHO นั้น อาจเป็นผลมาจากตัวอย่างดินนาข้าวก่อนการเพาะปลูกในพื้นที่ A มีค่าร้อยละความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้สูงสุด (ร้อยละ 74.6) ส่วนพื้นที่ C มีค่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมสูงที่สุด (71 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และร้อยละความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ (ร้อยละ 64.8) ซึ่งปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและร้อยละความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ที่สูงนั้นจะส่งผลทำให้ข้าวสามารถดูดดึงแคดเมียมขึ้นไปสะสมในเมล็ดข้าวได้สูงเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sriprachote et al. (2014) ที่รายงานว่าเมื่อความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและค่าร้อยละความ

เข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในดินเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ต้นข้าวดูดตั้งและการสะสมแคดเมียมในเมล็ดข้าวมากขึ้น

เนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีข้อกำหนดระดับเกณฑ์สูงสุดของแคดเมียมในเมล็ดข้าว ดังนั้นความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวของการศึกษานี้จึงถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาระดับของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียมในตำบลแม่ตาวอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (2559) ที่รายงานการปนเปื้อนแคดเมียมในเมล็ดข้าวในพื้นที่ A พื้นที่ B และพื้นที่ C (0.78, 1.67 และ 3.49 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำทั้ง 2 รูปแบบ 3 พื้นที่ศึกษา ในการศึกษานี้มีค่าต่ำกว่ารายงานการปนเปื้อนแคดเมียมในเมล็ดข้าวในพื้นที่ A พื้นที่ B และพื้นที่ C (ซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษาเดียวกันกับการศึกษานี้) ที่รายงานโดยกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (2559) ถึง 5.4, 7.1 และ 3.6 เท่า ตามลำดับ (เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นทั้งหมดแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกแบบ Conventional ในการศึกษา) และ 1.6, 9.3 และ 1.8 เท่า ตามลำดับ (เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกแบบ Treatment ในการศึกษา) การลดลงของปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวของการศึกษานี้ อาจเกิดจากปัจจัยด้านสภาพภูมิอากาศ เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิที่แตกต่างกันของพื้นที่เพาะปลูกที่อาจมีผลต่อความสามารถในการดูดตั้งแคดเมียมของข้าว (Thanapat et al., 2014) ทั้งนี้อาจรวมไปถึงวิธีการจัดการน้ำที่มีผลต่อความสามารถในการละลายของแคดเมียมในดิน ทำให้การสะสมแคดเมียมในเมล็ดข้าวลดลงด้วย

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำทั้ง 2 รูปแบบ ในทุกพื้นที่ศึกษาในการศึกษานี้มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) หากแต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระดับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Conventional) กับการเพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment) พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธี Conventional ในทุกพื้นที่ศึกษามีค่าน้อยกว่าการเพาะปลูกด้วยวิธี Treatment ประมาณ 1.6, 1.6 และ 1.9 เท่า ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าของ Ishikawa et al. (2016) ที่พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของ

แคดเมียมในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบดั้งเดิม (Flooded Condition) นั้นมักจะ มีค่าน้อยกว่าการเพาะปลูกข้าวด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition) ประมาณ 1.2 เท่า ในขณะที่ Liming Sun et al. (2014) รายงานว่าความเข้มข้นของแคดเมียมในข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบน้ำขังตลอดระยะเวลาการเพาะปลูก (Flooded Condition) นั้นอาจมีค่าน้อยกว่าการเพาะปลูกข้าวด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition) ได้สูงถึง 9.4 เท่า

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของระดับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวในแต่ละพื้นที่ศึกษา พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธี Conventional ของพื้นที่ C นั้น มีค่าสูงกว่าพื้นที่ A และพื้นที่ B อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ประมาณ 3.2 และ 8.9 เท่า ตามลำดับ และความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธี Treatment ของพื้นที่ C นั้น มีค่าสูงกว่าพื้นที่ A และพื้นที่ B อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ประมาณ 3.8 และ 10.6 เท่า ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ C มีค่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียม (71 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และร้อยละความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ (46.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ในดินก่อนการเพาะปลูกสูงกว่าพื้นที่ A และพื้นที่ B จึงส่งผลให้พื้นที่ C มีความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าวสูงกว่าพื้นที่ A และพื้นที่ B ของการเพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำทั้ง 2 รูปแบบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sriprachote et al. (2014) ที่รายงานว่าเมื่อความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและร้อยละความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในดินมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้การสะสมแคดเมียมในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นด้วย

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติในการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในตัวอย่างดินนาข้าวก่อนการเพาะปลูกข้าวด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Conventional) พบว่ามีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเชิงบวกสูงกับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าว ($R^2 = 0.977$, $p < 0.05$) และ ($R^2 = 0.978$, $p < 0.05$) (ตารางที่ 15) ตามลำดับ ในส่วนของความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในตัวอย่างดินนาข้าวก่อนการเพาะปลูกข้าวด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment) นั้นพบว่ามี

ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเชิงบวกสูงกับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในเมล็ดข้าว ($R^2=0.986$, $p<0.05$) และ ($R^2=0.986$, $p<0.05$) (ตารางที่ 16) ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) ของการศึกษาในครั้งนี้ พบว่า ปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมในข้าวยังมีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุ ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและความเข้มข้นที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ของแคดเมียมในดินก่อนการเพาะปลูกข้าวของการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกทั้ง 2 รูปแบบ (รูปที่ 33)

2) สารหนู (Arsenic)

ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในเมล็ดข้าว พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.37 ถึง 0.59 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับผลการศึกษาก่อนหน้าที่รายงานโดย Chanpiwat et al. (2018) ที่พบว่าระดับความเข้มข้นของสารหนูในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนแคดเมียม ในตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก มีค่าอยู่ในช่วง 0.199 ถึง 0.462 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อพิจารณาระดับความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในเมล็ดข้าวในพื้นที่ A พื้นที่ B และพื้นที่ C ซึ่งเพาะปลูกด้วยวิธี Conventional พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.39, 0.59 และ 0.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ในขณะที่เมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธี Treatment นั้น พบว่ามีความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนู เท่ากับ 0.37, 0.54 และ 0.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากผลผลิตในพื้นที่ A, B และ C ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานสารหนูในอาหารของประเทศไทยที่กำหนดโดยกระทรวงสาธารณสุข (2546) (2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในเมล็ดข้าวของทุกชุดการทดลอง มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานสารหนูในอาหารของประเทศไทยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

โดยทั่วไปแล้วความเป็นพิษของสารหนูมักขึ้นอยู่กับรูปฟอร์มทางเคมีของสารหนู โดยที่สารหนูอนินทรีย์นั้นมีความเป็นพิษมากกว่าสารหนูอินทรีย์ ด้วยเหตุนี้การศึกษานี้จึงได้ทำการประมาณค่าความเข้มข้นของสารหนูอนินทรีย์ในข้าว โดยใช้ค่าร้อยละเฉลี่ยของสารหนูอนินทรีย์ในความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในข้าว (63.2±1.3) ที่รายงานโดย Nookabkaew et al. (2013) ดังแสดงในตารางที่ 14 เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของสารหนูอนินทรีย์ในเมล็ดข้าวที่กำหนดโดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติและองค์การอนามัยโลก (FAO/WHO) (0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) (CODEX, 2014) พบว่าความเข้มข้นของสารหนูอนินทรีย์ในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำ

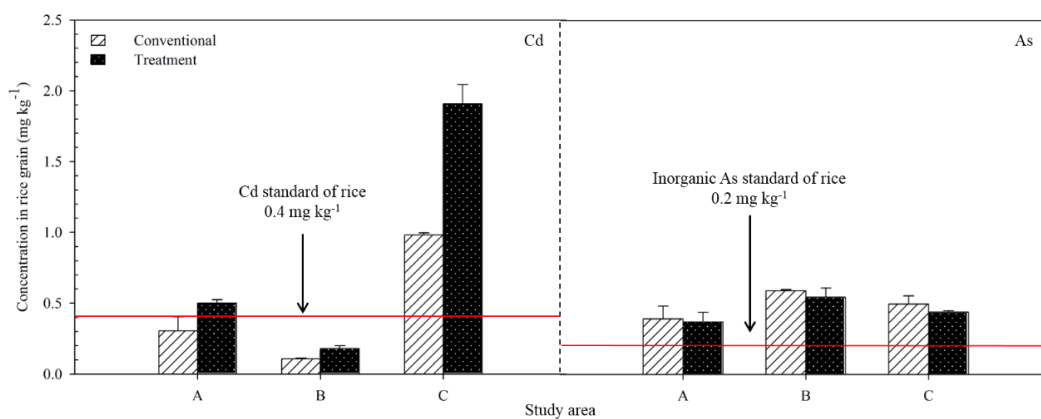
ทั้ง 2 รูปแบบใน 3 พื้นที่ศึกษา ในการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานของสารหนูอนินทรีย์ในเมล็ดข้าวที่กำหนดโดย FAO/WHO ถึง 1.2, 1.8 และ 1.6 เท่า สำหรับการเพาะปลูกข้าวด้วยวิธี Conventional และ 1.2, 1.7 และ 1.4 เท่า สำหรับการเพาะปลูกด้วยวิธี Treatment ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากพื้นที่ศึกษาดังกล่าวมีค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในดินสูง (23.3, 45.5 และ 36.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับพื้นที่ A, B และ C ตามลำดับ) ปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในดินในพื้นที่ศึกษาทั้ง 3 พื้นที่นั้นมีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการเกษตรของประเทศไทย (ต้องไม่เกิน 3.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จึงอาจส่งผลทำให้มีการสะสมสารหนูในเมล็ดข้าวสูงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าของ Patel et al. (2005) ที่รายงานว่าปริมาณการสะสมสารหนูในเมล็ดข้าวนั้นมักขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในดินและรวมไปถึงรูปฟอร์มของสารหนูในดินด้วย

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำทั้ง 2 รูปแบบ ในทุกพื้นที่ศึกษาในการศึกษานี้ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) หากแต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระดับความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Conventional) กับการเพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment) พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธี Treatment ในทุกพื้นที่ศึกษามีค่าน้อยกว่าการเพาะปลูกด้วยวิธี Conventional ประมาณ 1 และ 1.1 เท่า ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าของ Ishikawa et al. (2016) ที่พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition) นั้น มักจะมีค่าน้อยกว่าการเพาะปลูกแบบดั้งเดิม (Flooded Condition) ประมาณ 1.8 เท่า ในขณะที่ Hu et al. (2015) รายงานว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบน้ำขังตลอดระยะเวลาการเพาะปลูก (Flooded Condition) นั้นอาจมีค่ามากกว่าการเพาะปลูกข้าวด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition) ได้สูงถึง 2.3 เท่า

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของระดับความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในเมล็ดข้าวในแต่ละพื้นที่ศึกษา พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในเมล็ดข้าว

ที่เพาะปลูกด้วยวิธี Conventional ของพื้นที่ B นั้น มีค่าสูงกว่าพื้นที่ A และพื้นที่ C ประมาณ 1.5 และ 1.2 เท่า ตามลำดับ และความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกด้วยวิธี Treatment ของพื้นที่ B มีค่าสูงกว่าพื้นที่ C และพื้นที่ A อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ประมาณ 1.5 และ 1.2 เท่า ตามลำดับ เนื่องจากพื้นที่ B นั้น มีค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในดินก่อนการเพาะปลูกสูงกว่าพื้นที่ A และพื้นที่ C จึงส่งผลให้พื้นที่ B มีความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในเมล็ดข้าวสูงกว่าพื้นที่ A และพื้นที่ C ในการเพาะปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำทั้ง 2 รูปแบบ

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูและปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในตัวอย่างดินนาข้าวก่อนการเพาะปลูกข้าวด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Conventional) มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเชิงบวกสูงกับความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในเมล็ดข้าว ($R^2 = 0.998$, $p < 0.05$) และ ($R^2 = 0.849$, $p < 0.05$) (ตารางที่ 15) ตามลำดับ ในส่วนของการเพาะปลูกข้าวด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment) นั้นพบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูและปริมาณความเข้มข้นของสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในตัวอย่างดินนาข้าวก่อนการเพาะปลูกมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเชิงบวกสูงกับความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในเมล็ดข้าว ($R^2 = 0.977$, $p < 0.05$) และ ($R^2 = 0.918$, $p < 0.05$) (ตารางที่ 16) ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) ของการศึกษาในครั้งนี้ พบว่าปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในข้าวที่เพาะปลูกแบบ Conventional มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในดินและปริมาณอนุภาคดินเหนียว รวมไปถึงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน ในสัปดาห์ที่ 10 และ 13 อีกด้วย ในส่วนของการเพาะปลูกแบบ Treatment นั้น พบว่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในข้าวมีความสัมพันธ์กับปริมาณอนุภาคดินเหนียว ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูในดินและความเข้มข้นที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ของสารหนูในดิน นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในระหว่างการเพาะปลูกในสัปดาห์ 7, 9, 10 และ 11 ยังมีผลต่อการสะสมสารหนูในเมล็ดข้าวอีกด้วย (รูปที่ 33)



รูปที่ 32 แผนภูมิปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าวจากการเพาะปลูกแบบ Conventional และ Treatment

ตารางที่ 14 ค่าความเข้มข้นโดยประมาณของสารหนูอินทรีย์ในเมล็ดข้าว

| ชุดการทดลอง | ความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนู | สารหนูอินทรีย์ |
|----------------|-----------------------------|------------------------|
| | (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) |
| Conventional-A | 0.39±0.09 | 0.25±0.06 |
| Treatment-A | 0.37±0.07 | 0.23±0.04 |
| Conventional-B | 0.59±0.01 | 0.37±0.01 |
| Treatment-B | 0.54±0.06 | 0.34±0.04 |
| Conventional-C | 0.50±0.06 | 0.31±0.04 |
| Treatment-C | 0.44±0.01 | 0.28±0.01 |

ตารางที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นทั้งหมดและความเข้มข้นที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ของ แคดเมียมและสารหนูในดินก่อนการเพาะปลูกข้าวกับปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและ สารหนูในเมล็ดข้าวที่ปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบดั้งเดิม (Conventional)

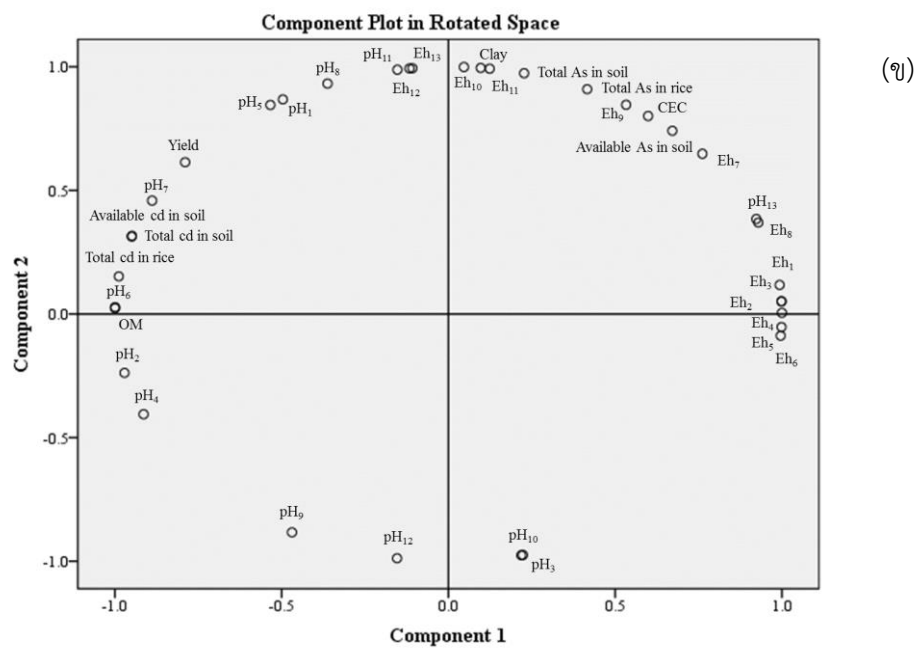
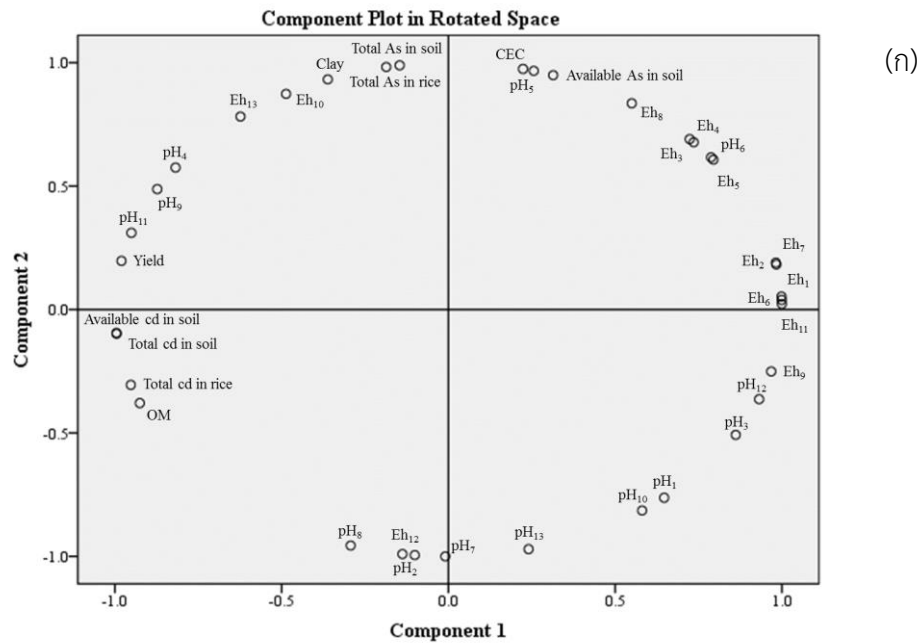
| | Total Cd | Total As | Bioavailable Cd | Bioavailable As | Total Cd in rice | Total As in rice |
|------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| Total Cd | 1 | | | | | |
| Total As | 0.092 | 1 | | | | |
| Bioavailable Cd | 1.00* | 0.089 | 1 | | | |
| Bioavailable As | 0.092 | 0.813* | -0.508 | 1 | | |
| Total Cd in rice | 0.977* | -0.120 | 0.978* | -0.676 | 1 | |
| Total As in rice | 0.028 | 0.998* | 0.025 | 0.849* | -0.184 | 1 |

หมายเหตุ : *ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นทั้งหมดและความเข้มข้นที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ของ แคดเมียมและสารหนูในดินก่อนการเพาะปลูกข้าวกับปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและ สารหนูในเมล็ดข้าวที่ปลูกด้วยวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment)

| | Total Cd | Total As | Bioavailable Cd | Bioavailable As | Total Cd in rice | Total As in rice |
|------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| Total Cd | 1 | | | | | |
| Total As | 0.092 | 1 | | | | |
| Bioavailable Cd | 1.00* | 0.089 | 1 | | | |
| Bioavailable As | -0.505 | 0.813* | -0.058 | 1 | | |
| Total Cd in rice | 0.986* | -0.076 | 0.986* | -0.643 | 1 | |
| Total As in rice | -0.121 | 0.977* | -0.124 | 0.918* | -0.286 | 1 |

หมายเหตุ : *ความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



รูปที่ 33 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักของคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินเพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยแวดล้อมระหว่างการเพาะปลูกแบบ (ก) Conventional และ (ข) Treatment ต่อปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว
หมายเหตุ: หมายเลข 1 ถึง 13 ที่กำกับอยู่กับค่า Eh และ pH แสดงถึงสัปดาห์ (Week) ที่ทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่า Eh และ pH ในระหว่างการเพาะปลูกข้าว (ตารางที่ 17)

ตารางที่ 17 สัปดาห์ที่ทำการตรวจวัดค่า Eh และ pH ในระหว่างการเพาะปลูกข้าวทั้ง 2 รูปแบบ

| สัปดาห์ | รูปแบบการจัดการน้ำระหว่างการเพาะปลูกข้าว | ระยะการเจริญเติบโต |
|---|---|-------------------------------|
| การเพาะปลูกข้าวแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ | | |
| 1 ถึง 4 | ขังน้ำ | ระยะต้นกล้า (เริ่มทำการปักดำ) |
| 5 ถึง 6 | | ระยะแตกกอของต้นข้าว |
| 7 ถึง 11 | | ระยะข้าวตั้งท้องถึงข้าวออกรวง |
| 12 ถึง 13 | ระบายน้ำออกทั้งหมดเพื่อเร่งการสุกของเมล็ดข้าว | ระยะเก็บเกี่ยว |
| การเพาะปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง | | |
| 1 ถึง 4 | ขังน้ำ | ระยะต้นกล้า (เริ่มทำการปักดำ) |
| 5 ถึง 6 | ระบายน้ำกลางฤดูกล | ระยะแตกกอของต้นข้าว |
| 7 ถึง 11 | การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง | ระยะข้าวตั้งท้องถึงข้าวออกรวง |
| 12 ถึง 13 | ระบายน้ำออกทั้งหมดเพื่อเร่งการสุกของเมล็ดข้าว | ระยะเก็บเกี่ยว |

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาเปรียบเทียบผลของวิธีการจัดการน้ำแบบดั้งเดิมที่เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Conventional) และวิธีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Treatment) ระหว่างการเพาะปลูกข้าวที่มีผลต่อการเจริญเติบโตทางลำต้นของข้าว ปริมาณผลผลิตข้าว และการสะสมแคดเมียมและสารหนูทั้งหมดในเมล็ดข้าว รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงปัจจัยแวดล้อม (ความเป็นกรด-ด่าง และความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน) ระหว่างการเพาะปลูกข้าว และการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีบางประการ (อินทรีย์วัตถุ ความเข้มข้นทั้งหมด และความเข้มข้นในสภาพพร้อมใช้) ของดินก่อนและหลังการเพาะปลูกข้าว สามารถสรุปผลการศึกษาที่สำคัญ ดังนี้

1) วิธีการจัดการน้ำที่แตกต่างกันไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตทางลำต้น (ความสูง) ของข้าวและปริมาณผลผลิตข้าว อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาพบว่าการเพาะปลูกแบบ Conventional นั้น ให้ผลผลิตข้าวสูงกว่าการเพาะปลูกแบบ Treatment ประมาณ 1.3 ถึง 2.0 เท่า

2) วิธีการจัดการน้ำที่แตกต่างกันส่งผลให้ปริมาณการสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าวแตกต่างกัน กล่าวคือ การเพาะปลูกแบบ Treatment จะทำให้เกิดการสะสมของแคดเมียมในเมล็ดข้าวมากกว่าการเพาะปลูกแบบ Conventional ประมาณ 1.6 ถึง 1.9 เท่า ในขณะที่การเพาะปลูกแบบ Conventional จะทำให้เกิดการสะสมของสารหนูในเมล็ดข้าวมากกว่าการเพาะปลูกแบบ Treatment ประมาณ 1 ถึง 1.1 เท่า เนื่องจากวิธีการจัดการน้ำที่แตกต่างกันนี้จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน และความเป็นกรด-ด่างของดินในระหว่างการเพาะปลูก ซึ่งจะทำให้อิออนของแคดเมียมและสารหนูในดินเปลี่ยนไปอยู่ในรูปฟอร์มที่ไม่ละลายน้ำหรือรูปฟอร์มที่พืชสามารถดูดดึงไปใช้ประโยชน์ได้ต่างกัน

3) เมล็ดข้าวที่เพาะปลูกได้จากการจัดการน้ำทั้งแบบ Conventional และแบบ Treatment ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าร้อยละ 50 ของผลผลิตข้าวที่เพาะปลูกได้มีค่าความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมต่ำกว่าค่ามาตรฐานของแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่กำหนดโดย FAO/WHO (0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ในขณะที่ผลผลิตข้าวที่เพาะปลูกได้ทั้งหมด (ร้อยละ 100) นั้นมีค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสารหนูสูง

เกินเกณฑ์มาตรฐานของสารหนูนินทรีย์ในเมล็ดข้าวที่กำหนดโดย FAO/WHO (0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

4) นอกจากนั้นแล้วผลการศึกษายังพบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ปริมาณผลผลิตข้าว โดยพบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินกับผลผลิตข้าว ที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.833 และ 0.832 สำหรับการเพาะปลูกแบบ Conventional และ Treatment ตามลำดับ ส่วนการสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าวนั้น พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูและปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในดินมีค่ามากขึ้น โดยพบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าวกับปริมาณความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดิน ที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.977 ($p < 0.05$) สำหรับแคดเมียม และ R^2 เท่ากับ 0.998 ($p < 0.05$) สำหรับสารหนู สำหรับการเพาะปลูกข้าวแบบ Conventional และ R^2 เท่ากับ 0.986 ($p < 0.05$) สำหรับแคดเมียม และ R^2 เท่ากับ 0.977 ($p < 0.05$) สำหรับสารหนู สำหรับการเพาะปลูกข้าวแบบ Treatment และปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในดิน ที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.978 ($p < 0.05$) สำหรับแคดเมียม และ R^2 เท่ากับ 0.849 ($p < 0.05$) สำหรับสารหนู สำหรับการเพาะปลูกข้าวแบบ Conventional และ R^2 เท่ากับ 0.986 ($p < 0.05$) สำหรับแคดเมียม และ R^2 เท่ากับ 0.918 ($p < 0.05$) สำหรับสารหนู สำหรับการเพาะปลูกข้าวแบบ Treatment

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลผลิตข้าวที่เพาะปลูกได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เช่น ความเข้มแสงและอุณหภูมิในพื้นที่เพาะปลูก นอกจากนั้นแล้วการสะสมแคดเมียมและสารหนูในเมล็ดข้าว นั้นยังขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินในพื้นที่เพาะปลูก เช่น ลักษณะเนื้อดิน ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดิน ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดิน และปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในดิน ดังนั้นเพื่อให้ผลการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่นาข้าวที่ปนเปื้อนแคดเมียมและสารหนูจริงได้อย่างเหมาะสม จึงควรมี

การศึกษาถึงการเจริญเติบโตและการสะสมแคดเมียมและสารหนูในผลผลิตข้าวที่เพาะปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนจริงด้วยวิธีการจัดการน้ำทั้ง 2 รูปแบบต่อไป

นอกจากนั้นในระหว่างการเพาะปลูกข้าวในพื้นที่ปนเปื้อนจริง ก็ควรดำเนินการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้ในระหว่างการจัดการน้ำและการเจริญเติบโตของต้นข้าวแต่ละระยะ เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการละลายของธาตุดังกล่าวที่อาจส่งผลต่อการดูดดีและการสะสมของธาตุทั้งสองในแต่ละช่วงการเจริญเติบโตของข้าวได้ อีกทั้งยังควรมีการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนูอนินทรีย์ในเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกได้อีกด้วย เพื่อให้ทราบถึงปริมาณการปนเปื้อนสารหนูอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนจริงในข้าวที่เพาะปลูกได้ และยังสามารถประเมินความเสี่ยงจากการบริโภคข้าวที่ปนเปื้อนสารหนูและแคดเมียมได้อย่างใกล้เคียงความเป็นจริงได้มากที่สุด เนื่องจากสารหนูอนินทรีย์นั้นมีความเป็นพิษมากกว่าสารหนูอินทรีย์ และเกณฑ์มาตรฐานของสารหนูในเมล็ดข้าวที่กำหนดโดย FAO/WHO นั้น คือสารหนูในรูปสารหนูอนินทรีย์มีใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมด

บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ (2554). โครงการสำรวจการกระจายตัวและแหล่งที่มาการปนเปื้อนของสารแคดเมียมในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาบ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. สำนักจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ.
- กรมพัฒนาที่ดิน (2558). สถานภาพทรัพยากรดินและดินของประเทศไทย. กรมพัฒนาที่ดิน กรุงเทพมหานคร.
- กรมวิชาการเกษตร (2531). รายงานสรุปผลการศึกษาปริมาณสารหนู (As) ในดิน-น้ำเพื่อการเกษตรและพืช ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กรุงเทพฯ: 27-29.
- กรมวิชาการเกษตร (2553). คู่มือวิธีวิเคราะห์ดินทางเคมีและฟิสิกส์. กลุ่มวิจัยเกษตรเคมี สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร: กรุงเทพมหานคร.
- กรมวิชาการเกษตร (2554). ความรู้เรื่องข้าว, ชุมชนสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (2555). โครงการสำรวจการกระจายตัวและแหล่งที่มาการปนเปื้อนโลหะหนักในเขตพื้นที่แหล่งแร่ทองคำภูทับฟ้า ต.เขาหลวง อ.วังสะพุง จ.เลย. กระทรวงอุตสาหกรรม กรุงเทพมหานคร.
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (2558). โครงการสำรวจและวิเคราะห์ผลกระทบจากการทำเหมืองทั้งประเทศ เพื่อเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาและการใช้ประโยชน์พื้นที่ศึกษาภายใต้พื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาบ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. กระทรวงอุตสาหกรรม กรุงเทพมหานคร.
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (2559). โครงการแก้ไขปัญหาดินและตะกอนดินในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาบ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. กระทรวงอุตสาหกรรม กรุงเทพมหานคร.
- กระทรวงพาณิชย์ (2540). ประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่อง มาตรฐานสินค้าข้าว พ.ศ. 2540 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 114 ตอนที่ 31 ง. กระทรวงพาณิชย์ กระทรวงพาณิชย์.
- คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2547). ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 ในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กรุงเทพมหานคร.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2555). สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2555. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กรุงเทพมหานคร.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2556). สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2556. กระทรวงการเกษตรและสหกรณ์ กรุงเทพมหานคร.

- สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2552). รายงานการศึกษา ติดตาม และพัฒนาระบบฐานข้อมูล โลหะหนักในดินปลูกพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กรุงเทพมหานคร.
- อรอนงค์ นัยวิกุล (2550). ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- เบญจวรรณ ฤกษ์เกษม (2561). วิทยาการข้าวไทย. คณะเกษตรศาสตร์, ศูนย์บริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Adriano, D. C. (2001). Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals, Springer New York.
- Aina, R., Labra, M., Fumagalli, P., Vannini, C., Marsoni, M., Cucchi, U., Bracale, M., Sgorbati, S. and Citterio, S. (2007). Thiol-peptide level and proteomic changes in response to cadmium toxicity in *Oryza Sativa* l. Roots. Environmental and Experimental Botany **59**(3): 381-392.
- Akkajit, P. (2015). Review of the current situation of Cd contamination in agricultural field in the Mae Sot District, Tak Province, Northwestern Thailand. Applied Environmental Research **37**(1): 71-82.
- Akkajit, P. and Tongcumpou, C. (2010). Fractionation of metals in cadmium contaminated soil: Relation and effect on bioavailable cadmium. Geoderma **156**(3): 126-132.
- Azam, S. M. G. G., Sarker, T. C. and Naz, S. (2016). Factors affecting the soil arsenic bioavailability, accumulation in rice and risk to human health: A review. Toxicology Mechanisms and Methods **26**(8): 565-579.
- Bareen, F.-e. and Tahira, S. A. (2011). Metal accumulation potential of wild plants in tannery effluent contaminated soil of kasur, pakistan: Field trials for toxic metal cleanup using *suaeda fruticosa*. Journal of Hazardous Materials **186**(1): 443-450.
- Bingham, F. T., Page, A. L., Mahler, R. J. and Ganje, T. J. (1976). Cadmium availability to rice in sludge-amended soil under "Flood" and "Nonflood" culture1. Soil Science Society of America Journal **40**(5): 715-719.
- Boonhong, C. and Wutthichai, T. (2016). Physical and chemical grain qualities of thammasat aromatic rice variety. Thai Journal of Science and Technology **5**(1): 37-42.

- Bowen, H. J. M. (1979). Environmental chemistry of the elements, Academic Press.
- Bradford, G. R., Change, A. C., Page, A. L., Bakhtar, D., Frampton, J. A., and Wright, H. (1996). Background concentrations of trace major elements in California soils. Retrieved 2018 16 January https://envisci.ucr.edu/downloads/chang/kearney_special_report_1996.pdf.
- Brady, N. C. and Weil, R. R. (2010). Elements of nature and properties of soil, student value edition 3rd edition, Upper Saddle River.
- Brookins, D. G. (1986). Geochemical behavior of antimony, arsenic, cadmium and thallium: Eh&pH diagrams for 25 °C, 1-bar pressure. Chemical Geology **54**(3): 271-278.
- Chanpiwat, P., Hensawang, S., Suwatvitayakorn, P. and Ponsin, M. (2018). Risk assessment of bioaccessible arsenic and cadmium exposure through rice consumption in local residents of the Mae Tao Sub-district, Northwestern Thailand. Environmental Geochemistry and Health **41**(1): 343-356.
- Chen, C. J., Chuang, Y. C., You, S. L., Lin, T. M. and Wu, H. Y. (1986). A retrospective study on malignant neoplasms of bladder, lung and liver in Blackfoot Disease Endemic Area in Taiwan. British Journal of Cancer **53**(3): 399-405.
- Chen, Z., Zhu, Y.-G., Liu, W.-J. and Meharg, A. A. (2005). Direct evidence showing the effect of root surface iron plaque on arsenite and arsenate uptake into rice (*Oryza Sativa*) roots. New Phytologist **165**(1): 91-97.
- Chibuike, G. and Obiora, S. (2014). Heavy metal polluted soils: Effect on plants and bioremediation methods. Applied and Environmental Soil Science **2014**: 1-12.
- CODEX (2014). Joint FAO/WHO food standards programme codex alimentarius commission report of the 37th session. Geneva, Switzerland.
- Datta, A., Ullah, H. and Ferdous, Z. (2017). Water management in rice. Rice production worldwide. B. S. Chauhan, K. Jabran and G. Mahajan. Cham, Springer International Publishing: 255-277.
- Davis, A., Ruby, M. V. and Bergstrom, P. D. (1994). Factors controlling lead bioavailability in the butte mining district, Montana, USA. Environmental Geochemistry and Health **16**(3): 147-157.
- de Livera, J., McLaughlin, M. J., Hettiarachchi, G. M., Kirby, J. K. and Beak, D. G. (2011).

- Cadmium solubility in paddy soils: Effects of soil oxidation, metal sulfides and competitive ions. Science of The Total Environment **409**(8): 1489-1497.
- Di Toppi, L. S. and Gabbrielli, R. (1999). Response to cadmium in higher plants. Environmental and Experimental Botany **41**(2): 105-130.
- DOA (2010). A handbook of soil analysis. Bangkok, Agriculture Production Science Research and Development Division.
- Duan, G., Shao, G., Tang, Z., Chen, H., Wang, B., Tang, Z., Yang, Y., Liu, Y. and Zhao, F.-J. (2017). Genotypic and environmental variations in grain cadmium and arsenic concentrations among a panel of high yielding rice cultivars. Rice **10**(1): 1-9.
- Evangelou, V. and Phillips, R. (2005). Cation exchange in soils. In: Tabatabaie and Sparks, D.L., editors. Chemical processes in soils.
- Fan, Y., Zhu, T., Li, M., He, J. and Huang, R. (2017). Heavy metal contamination in soil and brown rice and human health risk assessment near three mining areas in Central China. Journal of Healthcare Engineering **2017**: 1-9.
- Gavis, J. and Ferguson, J. F. (1972). The cycling of mercury through the environment. Water Research **6**(9): 989-1008.
- Ge, Y. and Hendershot, W. (2004). Evaluation of soil surface charge using the back-titration technique. Soil Science Society of America Journal **68**(1): 82-88.
- Greenwood, N. N. and Earnshaw, A. (2012). Chemistry of the elements, Elsevier.
- Gregori, I. D., Fuentes, E., Olivares, D. and Pinochet, H. (2004). Extractable copper, arsenic and antimony by EDTA solution from agricultural Chilean soils and its transfer to alfalfa plants (*Medicago Sativa* L.). Journal of Environmental Monitoring **6**(1): 38-47.
- Herawati, N., Suzuki, S., Hayashi, K., Rivai, I. and Koyama, H. (2000). Cadmium, copper, and zinc levels in rice and soil of Japan, Indonesia, and China by soil type. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology **64**(1): 33-39.
- Honma, T., Ohba, H., Kaneko-Kadokura, A., Makino, T., Nakamura, K. and Katou, H. (2016). Optimal soil Eh, pH and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains. Environmental Science & Technology **50**(8): 4178-4185.
- Hu, Yuanan, Cheng, H. and Tao, S. (2016). The challenges and solutions for cadmium-

- contaminated rice in China: A critical review. Environment International **92-93**(Supplement C): 515-532.
- Hu, P., Huang, J., Ouyang, Y., Zhou, L. Q., Huang, J. X., Huang, Y. J., Luo, Y. M., Christie, P. and Wu, L. H. (2013). Water management affects arsenic and cadmium accumulation in different rice cultivars. Environmental Geochemistry and Health **35**(6): 767-778.
- Hu, P., Ouyang, Y., Wu, L., Shen, L., Luo, Y. and Christie, P. (2015). Effects of water management on arsenic and cadmium speciation and accumulation in an upland rice cultivar. Journal of Environmental Sciences **27**: 225-231.
- Huang, Jang-Hung, Wang, S.-L., Lin, J.-H., Chen, Y.-M. and Wang, M.-K. (2013a). Dynamics of cadmium concentration in contaminated rice paddy soils with submerging time. Paddy and Water Environment **11**(1): 483-491.
- Huang, Zhu, Pan, X.-D., Wu, P.-G., Han, J.-L. and Chen, Q. (2013b). Health risk assessment of heavy metals in rice to the population in Zhejiang, China. ONE A Peer-Reviewed, Open Access Journal **8**(9): e75007.
- Husain, A., Baroon, Z., Al-khalafawi, M., Al-Ati, T. and Sawaya, W. (1995). Toxic metals in imported fruits and vegetables marketed in Kuwait. Environment International **21**(6): 803-805.
- Husson, O. (2013). Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: A transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. Plant and Soil **362**(1): 389-417.
- Ishikawa, S., Makino, T., Ito, M., Harada, K., Nakada, H., Nishida, I., Nishimura, M., Tokunaga, T., Shirao, K., Yoshizawa, C., Matsuyama, M., Abe, T. and Arao, T. (2016). Low-cadmium rice (*oryza sativa* l.) cultivar can simultaneously reduce arsenic and cadmium concentrations in rice grains. Soil Science and Plant Nutrition **62**(4): 327-339.
- Jalali, M. and Tabar, S. S. (2013). Kinetic extractions of nickel and lead from some contaminated calcareous soils. Soil and Sediment Contamination: An International Journal **22**(1): 56-71.
- Jo, I. S. and Koh, M. H. (2004). Chemical changes in agricultural soils of Korea: Data review and suggested countermeasures. Environmental Geochemistry and

Health **26**: 105-117.

- Kabata, A. and Pendias, H. (1985). Trace elements in soils and plants / alina kabata-pendias, henryk pendias.
- Khaokaew, S. and Landrot, G. (2015). A field-scale study of cadmium phytoremediation in a contaminated agricultural soil at Mae Sot District, Tak Province, Thailand: (1) Determination of Cd-hyperaccumulating plants. Chemosphere **138**(Supplement C): 883-887.
- Kibria, M. G., Osman, K. and Ahmed, M. (2007). Cadmium and lead uptake by radish (*raphanus sativus* l.) grown in three different textured soils. Soil and Environment **26**(2): 106-114.
- Kikuchi, T., Okazaki, M., Kimura, S. D., Motobayashi, T., Baasansuren, J., Hattori, T. and Abe, T. (2008). Suppressive effects of magnesium oxide materials on cadmium uptake and accumulation into rice grains: II: Suppression of cadmium uptake and accumulation into rice grains due to application of magnesium oxide materials. Journal of Hazardous Materials **154**(1): 294-299.
- Kirkham, M. B. (2006). Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. Geoderma **137**(1): 19-32.
- Kong, F. and Singh, R. (2008). Disintegration of solid foods in human stomach. Journal of Food Science **73**(5): R67-R80.
- Kosolsaksakul, P., Farmer, J. G., Oliver, I. W. and Graham, M. C. (2014). Geochemical associations and availability of cadmium (Cd) in a paddy field system, Northwestern Thailand. Environmental Pollution **187**: 153-161.
- Li, X., Xie, K., Yue, B., Gong, Y., Shao, Y., Shang, X. and Wu, Y. (2015). Inorganic arsenic contamination of rice from Chinese major rice-producing areas and exposure assessment in Chinese population. Science China Chemistry **58**(12): 1898-1905.
- Lin, H. T., Wong, S. S. and Li, G.-C. (2003). Heavy metal content of rice and shellfish in Taiwan. Journal of Food and Drug Analysis **12**(2): 167-174.
- Liu, B., Ai, S., Zhang, W., Huang, D. and Zhang, Y. (2017). Assessment of the bioavailability, bioaccessibility and transfer of heavy metals in the soil-grain-human systems near a mining and smelting area in NW China. Science of The Total Environment **609**(Supplement C): 822-829.

- Liu, J. G., Zhu, Q. S., Zhang, Z. J., Xu, J. K., Yang, J. C. and Wong, M. H. (2005). Variations in cadmium accumulation among rice cultivars and types and the selection of cultivars for reducing cadmium in the diet. Journal of the Science of Food and Agriculture **85**(1): 147-153.
- Makino, T. (2007). Heavy metal pollution of soil and a new approach to its remediation: Research experiences in Japan. Food and Fertilizer Technology Center: 1-23.
- Makino, T., Sugahara, K., Sakurai, Y., Takano, H., Kamiya, T., Sasaki, K., Itou, T. and Sekiya, N. (2006). Remediation of cadmium contamination in paddy soils by washing with chemicals: Selection of washing chemicals. Environmental Pollution **144**(1): 2-10.
- McBride, M. B. (1989). Reactions controlling heavy metal solubility in soils. Advances in Soil Science: 1-56.
- Meharg, A., Norton, G., M Deacon, C., Nicholas Williams, P., Adomako, E., Price, A., Zhu, Y., Li, G., Zhao, F.-J., McGrath, S., Villada, A., Sommella, A., De Silva, P. M., Brammer, H., Dasgupta, T. and M. Rafiqul Islam, a. (2013). Variation in rice cadmium related to human exposure.
- Meharg, A. A., Lombi, E., Williams, P. N., Scheckel, K. G., Feldmann, J., Raab, A., Zhu, Y. and Islam, R. (2008). Speciation and localization of arsenic in white and brown rice grains. Environmental Science & Technology **42**(4): 1051-1057.
- Meharg, A. A. and Rahman, M. M. (2003). Arsenic contamination of Bangladesh paddy field soils: Implications for rice contribution to arsenic consumption. Environmental Science & Technology **37**(2): 229-234.
- Meharg, A. A., Williams, P. N., Adomako, E., Lawgali, Y. Y., Deacon, C., Villada, A., Cambell, R. C. J., Sun, G., Zhu, Y.-G., Feldmann, J., Raab, A., Zhao, F.-J., Islam, R., Hossain, S. and Yanai, J. (2009). Geographical variation in total and inorganic arsenic content of polished (white) rice. Environmental Science & Technology **43**(5): 1612-1617.
- Mondal, D. and Polya, D. A. (2008). Rice is a major exposure route for arsenic in Chakdaha Block, Nadia District, West Bengal, India: A probabilistic risk assessment. Applied Geochemistry **23**.

- Monterroso, C., Rodríguez, F., Chaves, R., Diez, J., Becerra-Castro, C., Kidd, P. S. and Macías, F. (2014). Heavy metal distribution in mine-soils and plants growing in a Pb/Zn-mining area in NW Spain. Applied Geochemistry **44**: 3-11.
- Nookabkaew, S., Rangkadilok, N., Mahidol, C., Promsuk, G. and Satayavivad, J. (2013). Determination of arsenic species in rice from Thailand and other asian countries using simple extraction and HPLC-ICP-MS analysis. Journal of Agricultural and Food Chemistry **61**(28): 6991-6998.
- Nordstrom, D. K. (2002). Public health. Worldwide occurrences of arsenic in ground water. Science **296**.
- Patel, K. S., Shrivastava, K., Brandt, R., Jakubowski, N., Corns, W. and Hoffmann, P. (2005). Arsenic contamination in water, soil, sediment and rice of Central India. Environmental Geochemistry and Health **27**(2): 131-145.
- Patrick, W. H. and Mahapatra, I. C. (1968). Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. Advances in Agronomy **20**: 323-359.
- Phaenark, C., Pokethitiyook, P., Kruatrachue, M. and Ngernsarsaruay, C. (2009). Cd and Zn accumulation in plants from the padaeng zinc mine area. International Journal of Phytoremediation **11**(5): 479-495.
- Phan, K., Sthiannopkao, S., Heng, S., Phan, S., Huoy, L., Wong, M. H. and Kim, K.-W. (2013). Arsenic contamination in the food chain and its risk assessment of populations residing in the Mekong River Basin of Cambodia. Journal of Hazardous Materials **262**: 1064-1071.
- Phuong, T. D., Van Chuong, P., Khiem, D. T. and Kokot, S. (1999). Elemental content of vietnamese rice. Part 1. Sampling, analysis and comparison with previous studies. Analyst **124**(4): 553-560.
- Pietrzykowski, M., Socha, J. and van Doorn, N. S. (2014). Linking heavy metal bioavailability (Cd, Cu, Zn and Pb) in scots pine needles to soil properties in reclaimed mine areas. Science of the Total Environment **470**: 501-510.
- Pociecha, M., Kastelec, D. and Lestan, D. (2011). Electrochemical EDTA recycling after soil washing of Pb, Zn and Cd contaminated soil. Journal of Hazardous Materials **192**(2): 714-721.

- Pociecha, M. and Lestan, D. (2010). Electrochemical EDTA recycling with sacrificial anode for remediation of Pb contaminated soil. Environmental Pollution **158**(8): 2710-2715.
- Prasad, M. N. V., Nakbanpote, W., Sebastian, A., Panitlertumpai, N. and Phadermrod, C. (2015). Chapter 23 - phytomanagement of padaeng zinc mine waste, Mae Sot District, Tak Province, Thailand A2 - hakeem, khalid rehman. Soil Remediation and Plants: 661-687.
- Proshad, R., Ahmed, S., Rahman, M. and Kumar, T. (2017). Apportionment of hazardous elements in agricultural soils around the vicinity of Brick Kiln in Bangladesh. Journal of Environmental & Analytical Toxicology **7**(2): 68-78.
- Raghunath, R., Tripathi, R. M., Kumar, A. V., Sathe, A. P., Khandekar, R. N. and Nambi, K. S. V. (1999). Assessment of Pb, Cd, Cu, and Zn exposures of 6- to 10-year-old children in mumbai. Environmental Research **80**(3): 215-221.
- Rahman, M. M., Owens, G. and Naidu, R. (2009). Arsenic levels in rice grain and assessment of daily dietary intake of arsenic from rice in arsenic-contaminated regions of Bangladesh-implications to groundwater irrigation. Environmental Geochemistry and Health **31**(1): 179-187.
- Römkens, P. F., Guo, H.-Y., Chu, C.-L., Liu, T.-S., Chiang, C.-F. and Koopmans, G. F. (2009). Characterization of soil heavy metal pools in paddy fields in Taiwan: Chemical extraction and solid-solution partitioning. Journal of Soils and Sediments **9**(3): 216-228.
- Sarwar, N., Ullah, S., S Malhi, S., Zia, M., Naeem, A., Saif, S. and Farid, G. (2010). Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants. Journal of the Science of Food and Agriculture **90**(6): 925-937.
- Sebastian, A. and Prasad, M. N. V. (2014). Cadmium minimization in rice. A review. Agronomy for Sustainable Development **34**(1): 155-173.
- Sharma, V. K. and Sohn, M. (2009). Aquatic arsenic: Toxicity, speciation, transformations, and remediation. Environment International **35**(4): 743-759.
- Silva, A. L. O. d., Barrocas, P. R., Jacob, S. d. C. and Moreira, J. C. (2005). Dietary intake and health effects of selected toxic elements. Brazilian Journal of Plant Physiology **17**(1): 79-93.

- Simmons, R. W., Pongsakul, P., Saiyasitpanich, D. and Klinphoklap, S. (2005). Elevated levels of cadmium and zinc in paddy soils and elevated levels of cadmium in rice grain downstream of a zinc mineralized area in Thailand: Implications for public health. Environmental Geochemistry and Health **27**(5): 501-511.
- Siriprachai, S. (1995). Industrialisation and inequality in Thailand. Ingela Palmgren, Nild Fold, Johannes D. Schmidt and Jacques Hersh (EDS.). Emerging Classes and Growing Inequalities in Southeast Asia.
- Smith, A., Lingas, E. and Rahman, M. (2000). Contamination of drinking-water by arsenic in bangladesh: A public health emergency. Bulletin of the World Health Organization **78**(9): 8328-8335.
- Somenahally, A. C., Hollister, E. B., Yan, W., Gentry, T. J. and Loeppert, R. H. (2011). Water management impacts on arsenic speciation and iron-reducing bacteria in contrasting rice-rhizosphere compartments. Environmental Science & Technology **45**(19): 8328-8335.
- Sripachote, A., Kanyawongha, P., Ochiai, K. and Matoh, T. (2012). Current situation of cadmium-polluted paddy soil, rice and soybean in the Mae Sot Bistrict, Tak Province, Thailand. Soil Science and Plant Nutrition **58**(3): 349-359.
- Sripachote, A., Pengprecha, S., Pengprecha, P., Kanyawongha, P., Ochiai, K. and Matoh, T. (2014). Assessment of cadmium and zinc contamination in the soils around Pha Te Village, Mae Sot District, Tak Province, Thailand. Applied Environmental Research **36**(4): 67-79.
- Sun, L., Chen, S., Chao, L. and Sun, T. (2007). Effects of flooding on changes in Eh, pH and speciation of cadmium and lead in contaminated soil. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology **79**(5): 514-518.
- Sun, L., Zheng, M., Liu, H., Peng, S., Huang, J., Cui, K. and Nie, L. (2014). Water management practices affect arsenic and cadmium accumulation in rice grains. The Scientific World Journal **2014**(2014): 596438-596438.
- Sun, Y., Guo, J., Liu, F. and Liu, Y. (2014). Identification of indigenous yeast flora isolated from the five winegrape varieties harvested in Xiangning, China. Antonie van Leeuwenhoek **105**(3): 533-540.
- Swaddiwudhipong, W., Limpatanachote, P., Nishijo, M., Honda, R., Mahasakpan, P. and

- Krintratun, S. (2010). Cadmium-exposed population in Mae Sot District, Tak Province: 3. Associations between urinary cadmium and renal dysfunction, hypertension, diabetes, and urinary stones. Journal of the Medical Association of Thailand=Chotmaihet thangphaet **93**(2): 231-238.
- Talukder, A. S. M. H. M., Meisner, C. A., Sarkar, M. A. R., Islam, M. S. and Sayre, K. D. (2014). Effects of water management, arsenic and phosphorus levels on rice yield in high-arsenic soil-water system. Rice Science **21**(2): 99-107.
- Thanapat, P., Thongchai, M. and Arunsiri, K. (2014). Cadmium contents in rice grown in Cd contaminated paddy fields in Mae Tao flood plains Tak Province Thailand. Journal of Science and Technology **3**(2): 26-38.
- Tokalioglu, S., Kartal, S. and Birol, G. (2003). Application of a three-stage sequential extraction procedure for the determination of extractable metal contents in Highway soils. Turkish Journal of Chemistry **27**(3): 333-346.
- Vega, L., Styblo, M., Patterson, R., Cullen, W., Wang, C. and Germolec, D. (2001). Differential effects of trivalent and pentavalent arsenicals on cell proliferation and cytokine secretion in normal human epidermal keratinocytes. Toxicology and Applied Pharmacology **172**(3): 225-232.
- Walkley and Allan (1947). A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soils-effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. Soil Science **63**(4): 251-264.
- Webb, B. D. (1991). Rice quality and grades. Rice: Volume I. Production/volume II. Utilization. B. S. Luh. Boston, MA, Springer US: 508-538.
- Wichelns, D. (2016). Managing water and soils to achieve adaptation and reduce methane emissions and arsenic contamination in Asian rice production. Water. **8**: 141.
- Wuana, R. A. and Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. International Scholarly Research Notices **2011**: 1-20.
- Xue, S., Shi, L., Wu, C., Wu, H., Qin, Y., Pan, W.-s., Hartley, W. and Cui, M. (2017). Cadmium, lead, and arsenic contamination in paddy soils of a mining area and

their exposure effects on human hepg2 and keratinocyte cell-lines. Environmental Research **156**: 23-30.

Zarcinas, B. A., Pongsakul, P., McLaughlin, M. J. and Cozens, G. (2004). Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia 2. Thailand. Environmental Geochemistry and Health **26**(3): 359-371.

Zeng, F., Ali, S., Zhang, H., Ouyang, Y., Qiu, B., Wu, F. and Zhang, G. (2011). The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants. Environmental Pollution **159**(1): 84-91.

Zia-ur-Rehman, M., Sabir, M. and Nadeem, M. (2015). Remediating cadmium-contaminated soils by growing grain crops using inorganic amendments. Soil Remediation and Plants: Prospects and Challenges, Elsevier Inc., Academic Press: 367-396.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

มาตรฐานคุณสมบัติทางเคมีของดินนาข้าว

ตารางที่ ก-1 การจำแนกระดับค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันของดิน

| รีดักชัน (Reduction) | ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-reduction: Eh) (mV) |
|--|---|
| ดินที่มีการระบายน้ำได้ดี (Arated) | +700 ถึง +500 |
| ดินที่มีสภาพรีดักชันปานกลาง (Moderately Reduced) | +400 ถึง +200 |
| ดินที่มีสภาพรีดักชัน (Reduced) | +100 ถึง -100 |
| ดินที่มีสภาพรีดักชันสูงมาก (Highly Reduced) | -100 ถึง -300 |

ที่มา: Patrick and Mahapatra (1968)

ตารางที่ ก-2 การจำแนกระดับค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน

| สภาพความเป็นกรด-ด่างของดิน | ค่าความเป็นกรด-ด่าง |
|-------------------------------------|---------------------|
| กรดรุนแรงมากที่สุด (Ultra-acid) | <3.5 |
| กรดรุนแรงมาก (Extremely Acid) | 3.5 – 4.4 |
| กรดจัดมาก (Very Strong Acid) | 4.5 – 5.0 |
| กรดจัด (Strong Acid) | 5.1 – 5.5 |
| กรดปานกลาง (Moderately Acid) | 5.6 – 6.0 |
| กรดเล็กน้อย (Slightly Acid) | 6.1 – 6.5 |
| กลาง (Neutral) | 6.6 – 7.3 |
| ด่างเล็กน้อย (Slightly Alkaline) | 7.4 – 7.8 |
| ด่างปานกลาง (Moderately Alkaline) | 7.9 – 8.4 |
| ด่างจัด (Strongly Alkaline) | 8.5 – 9.0 |
| ด่างจัดมาก (Very strongly Alkaline) | > 9.0 |

ที่มา: กรมวิชาการเกษตร (2553)

ตารางที่ ก-3 การจำแนกระดับค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน

| ระดับ | ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดิน (cmol kg^{-1}) |
|--------------------|---|
| ต่ำ (Low) | 3 – 10 |
| ปานกลาง (Moderate) | 10 – 15 |
| สูง (High) | > 15 |

ที่มา: กรมวิชาการเกษตร (2553)

ตารางที่ ก-4 การจำแนกระดับของอินทรีย์วัตถุในดิน

| ระดับ | ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (%) |
|--------------------|------------------------------|
| ต่ำมาก (Very Low) | 0.5 – 1.0 |
| ต่ำ (Low) | 1.0 – 2.0 |
| ปานกลาง (Moderate) | 2.0 – 3.0 |
| สูง (High) | 3.0 – 5.0 |
| สูงมาก (Very High) | > 5.0 |

ที่มา: กรมวิชาการเกษตร (2553)

ตารางที่ ก-5 การจำแนกระดับปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Available P)

| ระดับ | ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) |
|--------------------|--|
| ต่ำมาก (Very Low) | < 5 |
| ต่ำ (Low) | 5 – 10 |
| ปานกลาง (Moderate) | 10 – 20 |
| สูง (High) | 20 – 25 |
| สูงมาก (Very High) | > 25 |

ที่มา: กรมวิชาการเกษตร (2553)

ตารางที่ ก-6 การจำแนกระดับปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน (Exchangeable K)

| ระดับ | ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน (mg kg^{-1}) |
|---------------------------------|---|
| ต่ำ (Low) | < 120 |
| ต่ำถึงเหมาะสม (Low to Adequate) | 120 – 190 |
| เหมาะสม (Adequate) | 191 – 300 |
| สูง (High) | > 300 |

ที่มา: กรมวิชาการเกษตร (2553)

ตารางที่ ก-7 ค่ามาตรฐานแคดเมียมและสารหนูในดินเพื่อการเกษตรกรรมของประเทศไทย ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547)

| ธาตุ | ค่ามาตรฐาน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) |
|---------------|-----------------------------------|
| แคดเมียม (Cd) | ต้องไม่เกิน 37 |
| สารหนู (As) | ต้องไม่เกิน 3.9 |

ที่มา: คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2547)

ภาคผนวก ข

ผลการตรวจวัดการเจริญเติบโตทางความสูงของต้นข้าวและการเปลี่ยนแปลงปัจจัยแวดล้อม
ระหว่างการเพาะปลูกข้าว

ตารางที่ ข-1 ผลการตรวจวัดการเจริญเติบโตด้านความสูงของต้นข้าว (n=5)

| ระยะเวลาการเพาะปลูก (วัน) | ชุดการทดลอง | ความสูงของต้นข้าว (เซนติเมตร) | | | | |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 30 | Conventional-A | 69 | 70 | 60 | 71 | 72 |
| | Treatment-A | 45 | 49 | 55 | 53 | 49 |
| | Conventional-B | 68 | 65 | 66 | 68 | 67 |
| | Treatment-B | 57 | 59 | 56 | 55 | 60 |
| | Conventional-C | 73 | 71 | 69 | 72 | 75 |
| | Treatment-C | 56 | 65 | 67 | 69 | 72 |
| 45 | Conventional-A | 92 | 95 | 95 | 89 | 93 |
| | Treatment-A | 70 | 68 | 64 | 71 | 70 |
| | Conventional-B | 82 | 83 | 94 | 92 | 99 |
| | Treatment-B | 84 | 66 | 71 | 73 | 82 |
| | Conventional-C | 94 | 95 | 92 | 98 | 100 |
| | Treatment-C | 83 | 84 | 92 | 99 | 94 |
| 60 | Conventional-A | 122 | 109 | 114 | 108 | 112 |
| | Treatment-A | 102 | 96 | 98 | 100 | 113 |
| | Conventional-B | 110 | 117 | 119 | 125 | 107 |
| | Treatment-B | 109 | 119 | 108 | 109 | 118 |
| | Conventional-C | 116 | 108 | 114 | 115 | 109 |
| | Treatment-C | 112 | 111 | 102 | 106 | 109 |

ตารางที่ ข-1 ผลการตรวจวัดการเจริญเติบโตด้านความสูงของต้นข้าว (ต่อ) (n=5)

| ระยะเวลาการเพาะปลูก (วัน) | ชุดการทดลอง | ความสูงของต้นข้าว (เซนติเมตร) | | | | |
|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 90 | Conventional-A | 114 | 123 | 109 | 109 | 114 |
| | Treatment-A | 96 | 101 | 100 | 112 | 103 |
| | Conventional-B | 125 | 120 | 107 | 110 | 119 |
| | Treatment-B | 109 | 114 | 119 | 121 | 116 |
| | Conventional-C | 114 | 109 | 118 | 117 | 106 |
| | Treatment-C | 116 | 113 | 109 | 116 | 104 |

ตารางที่ ข-2 ผลการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในดินระหว่างการเพาะปลูกข้าว (n=3)

| สัปดาห์ ที่ | ชุดการทดลอง | ค่าความเป็นกรด-ด่าง | | | ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (mV) | | |
|----------------|----------------|---------------------|------|------|--|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 1 | Conventional-A | 6.54 | 6.43 | 6.46 | 85.8 | 87.5 | 62.9 |
| | Treatment-A | 6.47 | 6.41 | 6.38 | 57.9 | 56.2 | 52.9 |
| | Conventional-B | 6.29 | 6.17 | 6.17 | 73.8 | 76.5 | 71.6 |
| | Treatment-B | 6.20 | 6.17 | 6.26 | 133 | 128 | 126 |
| | Conventional-C | 6.21 | 6.20 | 6.13 | -36.2 | -37.5 | -38.1 |
| | Treatment-C | 6.71 | 6.54 | 6.56 | -35.7 | -39.9 | -45.3 |
| 2 | Conventional-A | 6.99 | 6.96 | 6.96 | 53.7 | 51.5 | 51.4 |
| | Treatment-A | 6.70 | 6.70 | 6.70 | 58.0 | 53.0 | 50.3 |
| | Conventional-B | 6.74 | 6.68 | 6.68 | 62.9 | 64.8 | 62.4 |
| | Treatment-B | 6.49 | 6.49 | 6.49 | 90.4 | 108 | 108 |
| | Conventional-C | 6.88 | 6.88 | 6.88 | -42.9 | -45.7 | -44.8 |
| | Treatment-C | 6.88 | 6.88 | 6.88 | -42.9 | -44.0 | -44.0 |

ตารางที่ ข-2 ผลการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในดิน
ระหว่างการเพาะปลูกข้าว (ต่อ) (n=3)

| สปีดาร์ ที่ | ชุดการทดลอง | ค่าความเป็นกรด-ด่าง | | | ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน- รีดักชัน (mV) | | |
|----------------|----------------|---------------------|------|------|--|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 3 | Conventional-A | 6.71 | 6.72 | 6.72 | -11.3 | -9.70 | -11.0 |
| | Treatment-A | 6.91 | 6.91 | 6.90 | 32.8 | 29.4 | 25.7 |
| | Conventional-B | 6.65 | 6.63 | 6.63 | 75.5 | 72.9 | 72.5 |
| | Treatment-B | 6.81 | 6.81 | 6.81 | 81.7 | 81.1 | 79.8 |
| | Conventional-C | 6.57 | 6.58 | 6.59 | -58.5 | -60.8 | -61.0 |
| | Treatment-C | 6.78 | 6.81 | 6.83 | -56.7 | -57.2 | -57.2 |
| 4 | Conventional-A | 6.84 | 6.84 | 6.84 | -11.5 | -12.1 | -11.8 |
| | Treatment-A | 7.04 | 7.04 | 7.04 | 28.2 | 28.1 | 29.0 |
| | Conventional-B | 7.05 | 7.04 | 7.04 | 62.8 | 62.2 | 61.9 |
| | Treatment-B | 6.91 | 6.90 | 6.90 | 78.7 | 78.8 | 78.7 |
| | Conventional-C | 7.15 | 7.15 | 7.15 | -58.8 | -57.9 | -58.0 |
| | Treatment-C | 7.11 | 7.10 | 7.09 | -55.6 | -55.8 | -56.7 |
| 5 | Conventional-A | 6.82 | 6.88 | 6.84 | 24.4 | 21.1 | 19.9 |
| | Treatment-A | 6.32 | 6.86 | 6.95 | 60.3 | 60.1 | 60.3 |
| | Conventional-B | 7.22 | 7.21 | 7.2 | 66.7 | 64.9 | 68.8 |
| | Treatment-B | 7.00 | 6.77 | 6.87 | 88.7 | 89.3 | 88.4 |
| | Conventional-C | 6.86 | 6.86 | 6.86 | -13.1 | -18.5 | -20.9 |
| | Treatment-C | 6.88 | 6.88 | 6.88 | -13.3 | -12.8 | -13.8 |
| 6 | Conventional-A | 6.73 | 6.73 | 6.71 | 84.0 | 84.6 | 85.1 |
| | Treatment-A | 6.50 | 6.50 | 6.50 | 79.5 | 77.6 | 76.0 |
| | Conventional-B | 6.91 | 6.91 | 6.90 | 78.9 | 79.8 | 78.8 |
| | Treatment-B | 6.47 | 6.11 | 6.11 | 98.1 | 99.4 | 97.0 |
| | Conventional-C | 6.57 | 6.57 | 6.57 | -10.3 | -10.2 | -12.5 |
| | Treatment-C | 7.11 | 7.11 | 7.11 | 18 | 14.9 | 13.3 |

ตารางที่ ข-2 ผลการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ต่อ)
(n=3)

| สัปดาห์ ที่ | ชุดการทดลอง | ค่าความเป็นกรด-ด่าง | | | ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน- รีดักชัน (mV) | | |
|----------------|----------------|---------------------|------|------|--|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 7 | Conventional-A | 7.14 | 6.77 | 6.76 | 46.5 | 43.5 | 42.5 |
| | Treatment-A | 6.71 | 6.69 | 6.69 | 20.9 | 10.4 | 10.2 |
| | Conventional-B | 6.58 | 6.70 | 6.69 | 51.5 | 50.4 | 49.8 |
| | Treatment-B | 6.75 | 6.75 | 6.75 | 135 | 125 | 125 |
| | Conventional-C | 6.74 | 6.80 | 6.84 | -1.90 | -9.40 | -9.40 |
| | Treatment-C | 7.00 | 7.02 | 7.02 | 19 | 10.1 | 4.6 |
| 8 | Conventional-A | 6.89 | 6.89 | 6.89 | -16.4 | -16.0 | -20.3 |
| | Treatment-A | 6.70 | 6.71 | 6.70 | 7.70 | 8.00 | 10.1 |
| | Conventional-B | 6.68 | 6.66 | 6.69 | 46.8 | 46.4 | 39.4 |
| | Treatment-B | 6.94 | 6.80 | 6.81 | 67.2 | 60.7 | 60.5 |
| | Conventional-C | 6.88 | 6.82 | 6.88 | -28.5 | -30.2 | -28.9 |
| | Treatment-C | 6.81 | 6.94 | 6.89 | -14.4 | -21.8 | -21.8 |
| 9 | Conventional-A | 6.72 | 6.75 | 6.74 | -4.10 | -4.90 | -5.40 |
| | Treatment-A | 7.05 | 6.45 | 7.06 | -30.7 | -33.3 | -33.5 |
| | Conventional-B | 6.91 | 6.91 | 6.92 | -17.2 | -14.7 | -15.6 |
| | Treatment-B | 6.64 | 6.66 | 6.61 | 26.9 | 20.7 | 21.0 |
| | Conventional-C | 7.00 | 7.10 | 7.04 | -33.4 | -39.7 | -38.2 |
| | Treatment-C | 6.77 | 6.79 | 6.76 | -14.1 | -17.3 | -17.4 |
| 10 | Conventional-A | 6.46 | 6.40 | 6.44 | -11.8 | -18.0 | -17.8 |
| | Treatment-A | 7.32 | 7.17 | 6.63 | -17.5 | -20.1 | -20.8 |
| | Conventional-B | 6.20 | 6.28 | 6.19 | 1.10 | -2.10 | 3.40 |
| | Treatment-B | 6.33 | 6.33 | 6.32 | 47.5 | 43.7 | 41.8 |
| | Conventional-C | 6.18 | 6.23 | 6.25 | -2.00 | -0.70 | -0.60 |
| | Treatment-C | 6.30 | 6.31 | 6.31 | 24.7 | 23.6 | 23.2 |

ตารางที่ ข-2 ผลการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ต่อ)
(n=3)

| สัปดาห์ ที่ | ชุดการทดลอง | ค่าความเป็นกรด-ด่าง | | | ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน- รีดักชัน (mV) | | |
|----------------|----------------|---------------------|------|------|--|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 11 | Conventional-A | 6.81 | 6.80 | 6.80 | -5.60 | -9.40 | -8.80 |
| | Treatment-A | 6.83 | 6.81 | 6.80 | -36.2 | -37.8 | -39.4 |
| | Conventional-B | 6.59 | 6.59 | 6.58 | -10.1 | -12.0 | -13.0 |
| | Treatment-B | 6.83 | 6.81 | 6.79 | 18.8 | 18.3 | 18.4 |
| | Conventional-C | 6.84 | 6.81 | 6.81 | -54.9 | -59.4 | -61.8 |
| | Treatment-C | 6.77 | 6.77 | 6.77 | -1.10 | 2.90 | 3.60 |
| 12 | Conventional-A | 6.79 | 6.84 | 6.77 | 118 | 121 | 122 |
| | Treatment-A | 6.81 | 6.85 | 6.79 | 83.3 | 55.4 | 54.8 |
| | Conventional-B | 6.67 | 6.67 | 6.62 | 2.50 | -8.60 | -8.90 |
| | Treatment-B | 6.60 | 6.6 | 6.58 | 124 | 128 | 132 |
| | Conventional-C | 6.47 | 6.46 | 6.47 | 82.9 | 82.8 | 82.8 |
| | Treatment-C | 6.67 | 6.67 | 6.67 | 124 | 125 | 126 |
| 13 | Conventional-A | 6.75 | 6.76 | 6.76 | 142 | 142 | 143 |
| | Treatment-A | 6.52 | 6.54 | 6.55 | 142 | 141 | 141 |
| | Conventional-B | 6.46 | 6.50 | 6.40 | 198 | 199 | 199 |
| | Treatment-B | 6.64 | 6.61 | 6.64 | 203 | 203 | 208 |
| | Conventional-C | 6.56 | 6.57 | 6.57 | 206 | 204 | 199 |
| | Treatment-C | 6.47 | 6.55 | 6.46 | 199 | 198 | 197 |

ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดิน
และข้าวหลังการเพาะปลูก

ตารางที่ ค-1 ความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในดินหลังการเพาะปลูกข้าว (n=3)

| รูปแบบการจัดการน้ำระหว่าง การเพาะปลูกข้าว | ธาตุ | ชุดการทดลอง | ความเข้มข้นทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | | | |
|--|---|----------------|--|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | |
| การเพาะปลูกข้าวแบบดั้งเดิมที่ เกษตรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Flooded Condition) | แคดเมียม | Conventional-A | 0.846 | 0.889 | 0.861 | |
| | | Conventional-B | 0.758 | 1.242 | 1.154 | |
| | | Conventional-C | 66.27 | 69.22 | 71.35 | |
| | สารหนู | Conventional-A | 16.89 | 16.73 | 19.84 | |
| | | Conventional-B | 33.58 | 35.50 | 34.02 | |
| | | Conventional-C | 35.52 | 31.52 | 34.51 | |
| | การเพาะปลูกข้าวแบบเปียก สลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition) | แคดเมียม | Treatment-A | 1.447 | 1.360 | 1.298 |
| | | | Treatment-B | 0.777 | 0.729 | 0.670 |
| | | | Treatment-C | 59.27 | 67.51 | 72.05 |
| สารหนู | | Treatment-A | 24.16 | 18.71 | 23.51 | |
| | | Treatment-B | 42.85 | 43.00 | 42.04 | |
| | | Treatment-C | 33.75 | 37.43 | 32.51 | |

ตารางที่ ค-2 ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้หลังการเพาะปลูกข้าว (n=3)

| รูปแบบการจัดการน้ำระหว่าง การเพาะปลูกข้าว | ธาตุ | ชุดการทดลอง | ความเข้มข้นทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | | | |
|--|---|----------------|--|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | |
| การเพาะปลูกข้าวแบบดั้งเดิมที่ เกษตรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Flooded Condition) | แคดเมียม | Conventional-A | 0.526 | 0.655 | 0.523 | |
| | | Conventional-B | 0.383 | 0.389 | 0.400 | |
| | | Conventional-C | 23.24 | 23.53 | 21.82 | |
| | สารหนู | Conventional-A | 0.454 | 0.620 | 0.462 | |
| | | Conventional-B | 0.844 | 0.855 | 0.624 | |
| | | Conventional-C | 0.496 | 0.518 | 0.368 | |
| | การเพาะปลูกข้าวแบบเปียก สลับแห้ง (Alternate Wetting and Drying Condition) | แคดเมียม | Treatment-A | 0.653 | 0.521 | 0.679 |
| | | | Treatment-B | 0.480 | 0.600 | 0.364 |
| | | | Treatment-C | 27.50 | 21.86 | 27.22 |
| สารหนู | | Treatment-A | 0.566 | 0.417 | 0.559 | |
| | | Treatment-B | 0.840 | 0.894 | 0.927 | |
| | | Treatment-C | 0.478 | 0.691 | 0.705 | |

ตารางที่ ค-3 ความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในข้าวขาว (n=2)

| รูปแบบการจัดการน้ำระหว่าง การเพาะปลูกข้าว | ชุดการทดลอง | ความเข้มข้นทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | | | |
|--|----------------|--|-------|--------|-------|
| | | แคดเมียม | | สารหนู | |
| | | 1 | 2 | 1 | 2 |
| การเพาะปลูกข้าวแบบดั้งเดิมที่ เกษตรกรในพื้นที่ศึกษาปฏิบัติ (Flooded Condition) | Conventional-A | 0.237 | 0.376 | 0.327 | 0.455 |
| | Conventional-B | 0.112 | 0.103 | 0.597 | 0.585 |
| | Conventional-C | 0.993 | 0.971 | 0.456 | 0.538 |
| การเพาะปลูกข้าวแบบเปียก สลับแห้ง(Alternate Wetting and Drying Condition) | Treatment-A | 0.517 | 0.482 | 0.418 | 0.321 |
| | Treatment-B | 0.166 | 0.195 | 0.591 | 0.500 |
| | Treatment-C | 2.004 | 1.813 | 0.446 | 0.433 |

ภาคผนวก ง
ภาพการทดลองการเพาะปลูกข้าวในการศึกษานี้



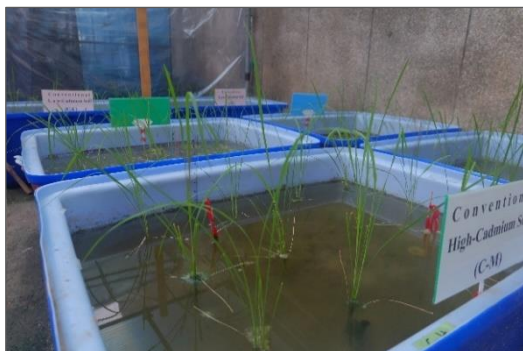
รูปที่ ง-1 ระยะข้าวงอก ถึงระยะการเพาะต้นกล้า



รูปที่ ง-2 แปลงนาข้าวจำลอง



รูปที่ ง-3 การปักดำต้นข้าว



รูปที่ ง-4 การเจริญเติบโตของข้าวในระยะแตกกอของต้นข้าว 14 วัน หลังปักดำ



รูปที่ ง-5 การเจริญเติบโตของข้าวในระยะแตกกอของต้นข้าว 28 วัน หลังปักดำ



รูปที่ ง-6 การเจริญเติบโตของข้าวในระยะข้าวสร้างรวงอ่อน หรือกำเนิดช่อดอก



รูปที่ ง-7 การเจริญเติบโตของข้าวในระยะตั้งท้อง ถึงระยะข้าวออกรวง



รูปที่ ง-8 การเจริญเติบโตของข้าวในระยะออกรวง



รูปที่ ง-9 การเจริญเติบโตของข้าวในระยะข้าวสร้างรวง ถึงระยะเก็บเกี่ยว



รูปที่ ง-10 ผลผลิตข้าวที่เก็บเกี่ยวได้จากการทดลอง

ประวัติผู้เขียน

| | |
|-------------------|--|
| ชื่อ-สกุล | มนตรี ผลสินธ์ |
| วัน เดือน ปี เกิด | 6 พฤษภาคม 2535 |
| สถานที่เกิด | จังหวัดอุบลราชธานี |
| วุฒิการศึกษา | วิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม) คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม วันที่จบการศึกษา 6 มิถุนายน พ.ศ. 2557 (ปีการศึกษา 2556) |
| ที่อยู่ปัจจุบัน | 227 หมู่ 14 บ้านสุขเกษม ตำบลคันไร่ อำเภอสิรินธร จังหวัดอุบลราชธานี |
| ผลงานตีพิมพ์ | 1. Chanpiwat, P., Hensawang, S., Suwatvitayakorn, P. and Ponsin, M. (2018). Risk assessment of bioaccessible arsenic and cadmium exposure through rice consumption in local residents of the Mae Tao Sub-district, Northwestern Thailand. <i>Environmental Geochemistry and Health</i> 41(1): 343-356. 2. มนตรี ผลสินธ์ และ เพ็ญรติ จันทร์ภิววัฒน์. (2562). ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีกับความเข้มข้นทั้งหมดของแคดเมียมและสารหนูในดินนาข้าว: กรณีศึกษาของพื้นที่ ต.แม่ตาว อ.แม่สอด จ.ตาก. การนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 วันที่ 15 มีนาคม 2562 ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| รางวัลที่ได้รับ | การนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ระดับดี (แบบโปสเตอร์) ระดับปริญญาโท กลุ่มวิทยาศาสตร์กายภาพ ในการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 วันที่ 15 มีนาคม พ.ศ. 2562 ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น |