ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการจัดการทาง

ปริญญา

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการจัดการทางดิน ปฐพีวิทยา

สาขา **ภาควิชา**

เรื่อง การสะสมแคดเมียมของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่ ลุ่มน้ำแม่ตาว จังหวัดตาก ประเทศไทย

Cadmium Accumulation of Rice Grown in Cadmium Contaminated Soil at Mae Tao Watershed Tak Province Thailand

นามผู้วิจัย นายธนภัทร ปลื้มพวก

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

(รองศาสตราจารย์ธงชัย มาลา, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรุณศิริ กำลัง, D.Agr.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์, วท.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การสะสมแคดเมียมของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่ ลุ่มน้ำแม่ตาว จังหวัดตาก ประเทศไทย

Cadmium Accumulation of Rice Grown in Cadmium Contaminated Soil at Mae Tao Watershed Tak Province Thailand

โดย

นายธนภัทร ปลื้มพวก

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการจัดการทางดิน)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ธนภัทร ปลื้มพวก 2557: การสะสมแคดเมียมของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาว จังหวัดตาก ประเทศไทย ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการจัดการทางดิน) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการจัดการทางดิน ภาควิชาปฐพีวิทยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ธงชัย มาลา, Ph.D. 70 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสถานการณ์ปนเปื้อนแคดเมียมในดินก่อนปลูกและหลังเก็บเกี่ยวข้าวและการสะสมแคดเมียมในข้าวที่ปลูกในบริเวณลุ่มน้ำแม่ตาว โดยใช้พื้นที่ปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จำนวน 12 แปลง ของพื้นที่ 3 กลุ่ม คือพื้นที่ต้นน้ำ (0-7 กม. ของความยาวลำน้ำแม่ตาว) พื้นที่กลางน้ำ (7-14 กม. ของความยาวลำน้ำแม่ตาว) และพื้นที่ปลายน้ำ (14-21 กม. ของความยาวลำน้ำแม่ตาว) ผลการศึกษาพบว่าปริมาณแคดเมียมในดินมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่าปริมาณแคดเมียมสูงสุดในแปลง 12_{EW} ของพื้นที่ศึกษา (46.87 มก./กก.) และในแปลง 10_{EW} มีปริมาณแคดเมียมต่ำที่สุด (11.45 มก./กก.) ปริมาณแคดเมียมในดินเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มพื้นที่ศึกษามีความแตกต่างกัน พื้นที่ต้นน้ำมีปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 24.78 มก./กก. การสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่อายุต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อข้าวอายุ 45 วัน พบปริมาณแคดเมียมสูงสุดในแปลง 8_{MW} ของพื้นที่ศึกษา (12.71 มก./กก.) ขณะที่อายุข้าว 90 วัน พบปริมาณแคดเมียมสูงสุดในแปลง 2_{HW} ของพื้นที่ศึกษา (16.06 มก./กก.) ส่วนที่อายุข้าว 120 วัน พบปริมาณแคดเมียมสูงสุดในแปลง 1_{HW} ของพื้นที่ศึกษา (17.34 มก./กก.) การสะสมแคดเมียมในข้าวสารและแกลบ มีปริมาณสูงสุดในแปลง 5_{MW} และ 4_{HW} ของพื้นที่ศึกษา (9.27 และ 10.42 มก./กก.) ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน EU และพบว่าผลผลิตข้าวลดลงในแปลงที่มีปริมาณแคดเมียมในดินสูงกว่า 20 มก./กก.

_____ _____ ___/___/___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Thanapat Pluemphuak 2014: Cadmium Accumulation of Rice Grown in Cadmium Contaminated Soil at Mae Tao Watershed Tak Province Thailand. Master of Science (Soil Science and Management Techonology), Major Field: Soil Science and Management Techonology, Department of Soil Science. Thesis Advisor: Assistant Professor Thongchai Mala, Ph.D. 70 pages.

This research aimed to study the content of the cadmium (Cd) contamination in paddy fields before planting and after harvest and the accumulation of Cd in rice grown in Mae Tao watershed area. The studies were conducted in 12 sites of Khao Dawk Mali 105 rice growing of three areas group based on stream length as head watershed area (HW; 0-7 km), middle watershed area (MW; 7-14 km) and the end watershed area (EW; 14-21 km). The results showed that the cadmium content in soil is significantly different at the 99 percent confident level. The 12_{EW} of study area had the highest of Cd concentration (46.87 mg/kg),while that of 10_{EW} had the lowest one (11.45 mg/kg). The average Cd concentration of various area group were significantly different. The HW had the highest average of Cd content (24.78 mg/kg). The accumulated Cd in various age of rice were significantly different. The Cd content of 45 days rice was the highest in the 8_{MW} (12.71 mg/kg), meanwhile that of 2_{HW} showed the highest Cd content (16.06 mg/kg) at 90 days, but the 1_{HW} showed the highest Cd content (17.34 mg/kg) at 120 days. The 5_{MW} and 4_{HW} showed the highest Cd content in milled rice (9.27 mg/kg) and rice husk (10.42 mg/kg), respectively, which were higher than that of the EU standard. Moreover, it was found that, the rice yield decreased as the soil Cd content was higher than 20 mg/kg.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาและวิจัยตลอดจนการเรียบเรียงวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี จากความกรุณาของรศ. ดร. ธงชัย มาลา ประธานกรรมการที่ปรึกษา ผศ.ดร.อรุณศิริ กำลังคณะกรรมการที่ปรึกษาร่วม และอาจารย์จันทร์จรัส วีรสาร ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา และคำแนะนำในการศึกษาและวิจัยตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ รวมทั้ง ดร. ศุภชัย อำคา ประธานการสอบ และดร.อรทัย ศุกรียพงศ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ได้กรุณาให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทั้ง 5 ท่านไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์วิจัยดินพืช และวัสดุเกษตร ฝ่ายปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง ที่ได้ช่วยเหลือในการทำงานต่างๆ ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณครอบครัวนายสิปปวิชญ์ ปัญญาตุ้ย ที่ได้อนุเคราะห์ให้ที่พักและการช่วยเหลือต่างๆ ตลอดการศึกษาวิจัยครั้งนี้ และขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้อง ๆ ในภาควิชาปฐพีวิทยาทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา

เหนือสิ่งอื่นใดข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ที่ให้การดูแล กำลังใจ ทุนทรัพย์ และการสนับสนุนในทุกเรื่องของการศึกษาครั้งนี้ รวมถึงบุคคลต่างๆ ที่เฝ้าคอยความสำเร็จด้วยความห่วงใยเสมอมา และข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรและผู้ที่มีความสนใจเกี่ยวกับการสะสมแคดเมียมของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อน

ธนภัทร ปลื้มพวก

กรกฎาคม 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	19
อุปกรณ์	19
วิธีการ	20
ผลและวิจารณ์	25
สรุปและข้อเสนอแนะ	55
สรุป	55
ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	57
ภาคผนวก	64
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	70

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติดินบางประการและปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินก่อนปลูกข้าว	26
2	สมบัติดินบางประการและปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินของพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ	28
3	สมบัติดินบางประการและปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินของพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ	29
4	สมบัติดินบางประการและปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินของพื้นที่ปลูกข้าวปลายน้ำ	29
5	เปรียบเทียบสมบัติบางประการและปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินของก่อนปลูกแต่ละกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าว	30
6	ความสูงและผลผลิตของต้นข้าวในพื้นที่ศึกษา	34
7	ความสูงของต้นข้าวในพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ	35
8	ความสูงของต้นข้าวในพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ	35
9	ความสูงของต้นข้าวในพื้นที่ปลูกข้าวปลายน้ำ	36
10	ความสูงเฉลี่ยของต้นข้าวในแต่ละกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าว	36
11	ผลผลิตของข้าวในพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ	37
12	ผลผลิตของข้าวเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าว	38
13	การสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่อายุต่างๆ	39
14	การสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่อายุต่างๆ บนพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ	40
15	การสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่อายุต่างๆ บนพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ	41
16	การสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่อายุต่างๆ บนพื้นที่ปลูกข้าวปลายน้ำ	41
17	การสะสมแคดเมียมเฉลี่ยในต้นข้าวที่อายุต่างๆ ของแต่ละกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าว	42
18	น้ำหนักแห้งของต้นข้าวที่อายุต่างๆ	43
19	การสะสมแคดเมียมในผลผลิตข้าว	45
20	การสะสมแคดเมียมในผลผลิตข้าวของกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ	46
21	การสะสมแคดเมียมในผลผลิตข้าวของแต่ละกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าว	46
22	สมบัติดินบางประการและปริมาณแคดเมียมในดินหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต	53

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ **หน้า**

1	ตำแหน่งบนพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ	65
2	ตำแหน่งบนพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ	66
3	ตำแหน่งบนพื้นที่ปลูกข้าวปลายน้ำ	67
4	การประเมินระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินจากผลการวิเคราะห์ดิน	68
5	ชั้นมาตรฐานระดับปฏิกิริยาของดิน (Soil reaction, pH) ดิน : น้ำ (1:1)	69

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะภูมิประเทศบางส่วนของพื้นที่ศึกษา (ก) ตำบลพระธาตุผาแดงและ (ข) ตำบลแม่ตาว	18
2	พื้นที่ปลูกข้าวบริเวณใกล้เคียงลำน้ำแม่ตาว 3 กลุ่ม คือ พื้นที่ต้นน้ำ (HW) กลางน้ำ (MW) และปลายน้ำ (EW)	21
3	ระดับการปนเปื้อนแคดเมียมในดินก่อนปลูกข้าว	31
4	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้กับผลผลิตข้าว	47
5	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดิน กับความสูงของข้าวที่อายุ 45 90 และ 120 วัน ตามลำดับ	49
6	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดิน กับการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือดินของข้าวที่อายุ 45 90 และ 120 วัน ตามลำดับ	50
7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดิน กับน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินของข้าวที่อายุ 45 90 และ 120 วัน ตามลำดับ	51
8	เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมในดินก่อนปลูก (ก) และหลังเก็บเกี่ยวผลผลิต (ข)	54

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การสะสมแคดเมียมของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่ ลุ่มน้ำแม่ตาว จังหวัดตาก ประเทศไทย

Cadmium Accumulation of Rice Grown in Cadmium Contaminated Soil at Mae Tao Watersheds Tak Province Thailand

คำนำ

แคดมียมเป็นโลหะหนักที่จัดเป็นธาตุพิษ สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดการปนเปื้อนในพื้นที่ ๆ ทำการเกษตร เนื่องจากแคดเมียมสามารถเกิดการสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต และถ่ายทอดไปสู่ระบบห่วงโซ่อาหารของมนุษย์และสัตว์ได้หากบริโภคพืชที่ปลูกในพื้นที่ ๆ ปนเปื้อน และการสะสมแคดเมียมปริมาณสูงในลุ่มน้ำจะส่งเสริมให้แคดเมียมเคลื่อนย้ายไปสู่ลำห้วยและน้ำชลประทาน (Takijima and Katsumi, 1973) และเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว โดยแคดเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 2 ทาง คือ ทางเดินอาหารและทางเดินหายใจ แคดเมียมเป็นธาตุที่ละลายน้ำได้และเมื่อสะสมเป็นปริมาณมากก่อให้เกิดการทำลายไต (Singh and Mc Laughlin, 1999) ดังนั้นแคดเมียมจึงเป็นธาตุที่ควรติดตาม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคการเกษตร เพราะสามารถสะสมในพืชบริโภคในระดับที่เป็นพิษต่อมนุษย์ และสัตว์ได้ โดยเฉพาะข้าว (*Oryza sativa* L.) ซึ่งเป็นพืชที่สำคัญของโลกที่มนุษย์ใช้รับประทาน (Kirkham, 2006) พื้นที่นาข้าวส่วนใหญ่ในทวีปเอเชียเป็นพื้นที่ได้รับน้ำชลประทาน Yanagisawa *et al.* (1984) รายงานว่าในประเทศญี่ปุ่น มีประชาชนเจ็บป่วยเนื่องจากแคดเมียมที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน โดยแคดเมียมที่มีอยู่ในวัสดุเหลือทิ้งจากเหมืองแร่สังกะสีเข้ามาปนเปื้อนในนาข้าว เป็นผลให้ข้าวดึงแคดเมียมจากดินมาใช้และเกิดการสะสมในเมล็ด ทำให้เกิดการเจ็บป่วยของประชาชนที่บริโภคข้าวที่ปลูกในนาที่มีการปนเปื้อน

ประเทศไทยพบการปนเปื้อนแคดเมียมบริเวณบ้านผะเด๊ะในพื้นที่ทำการปลูกข้าว ซึ่งตั้งอยู่ในอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก จากการสำรวจตัวอย่างดินและข้าวที่ทำการปลูกข้าวในพื้นที่ดังกล่าว พิชิต (2545) รายงานพบตัวอย่างดินบริเวณที่ติดกับคลองส่งน้ำเข้าแปลงปลูกข้าวมีความเข้มข้นของแคดเมียมสูงมาก (> 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และพบว่าตัวอย่างข้าวมีความเข้มข้นของแคดเมียมในเมล็ดข้าวสูงกว่าค่าความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้ของสำนักงานอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา ซึ่งกำหนดไว้เท่ากับ 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม Anongnat *et al*. (2012) ได้ประเมินการปนเปื้อน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แคดเมียมในนาข้าว จากครัวเรือนที่บริโภคข้าวจำนวน 23 ครัวเรือนในหมู่บ้านพะเด๊ะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก พบว่าความเข้มข้นแคดเมียมในเมล็ดข้าวเปลือกมีตั้งแต่ 0.04-1.75 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมากกว่าครึ่งหนึ่งของตัวอย่างข้าวทั้งหมดที่ศึกษามีระดับแคดเมียมสูงกว่ามาตรฐาน CODEX ปัญหาดินที่ปนเปื้อนธาตุโลหะหนักในพื้นที่ดังกล่าวจึงจัดเป็นปัญหาเร่งด่วนในขณะนั้น คณะรัฐบาลไทยจึงได้จัดปัญหาดังกล่าวเข้าเป็นวาระแห่งชาติ พ.ศ.2547 เพื่อเร่งหาแนวทางแก้ไขปัญหารวมทั้งดูแลความปลอดภัยสุขภาพของประชาชนในพื้นที่ โดยได้จัดหาพืชอื่นเพื่อปลูกทดแทนข้าว เช่น ส่งเสริมให้ปลูกอ้อยและยางพารา เป็นต้น แต่ในปัจจุบันเกษตรกรในพื้นที่ ไม่ได้ปลูกพืชตามที่รัฐบาลแนะนำ แต่หันกลับมาใช้พื้นที่ดังกล่าวปลูกข้าวเนื่องจากข้าว เป็นพืชอาหารหลักของคนในพื้นที่ และพื้นที่แถบนี้ก็เป็นที่ลุ่มเหมาะกับการทำนาไม่เหมาะกับพืชที่รัฐบาลแนะนำ ด้วยสาเหตุนี้แคดเมียมจึงเป็นโลหะหนักที่น่าสนใจและทำการวิจัยในข้าวเพื่อเป็นแนวทางให้เกษตรกรในพื้นที่รับรู้ถึงปริมาณการปนเปื้อนแคดเมียมในดินและการสะสมในข้าว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปริมาณแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินนา บริเวณลุ่มน้ำแม่ตาว ในพื้นที่ ตำบลพระธาตุผาแดงและตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสะสมแคดเมียมในข้าวกับความเข้มข้นของแคดเมียมในดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโลหะหนักแคดเมียม

1.1 นิยามและความหมาย

แคดเมียมเป็นธาตุในกลุ่มโลหะหนักที่อยู่ในหมู่ IIB ของตารางธาตุ มีสัญลักษณ์ทางเคมีในตารางธาตุ คือ Cd จัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับสังกะสี และปรอท มีเลขอะตอม เท่ากับ 48 มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 112.40 มีความหนาแน่นเท่ากับ 8.65 ที่ 20 °C มีจุดหลอมเหลว 321 °C มีจุดเดือด 765 °C (เขมชิต และคณะ, 2551)

แคดเมียมมีสีขาวฟ้า วาวแสง สามารถบิดโค้งงอได้และถูกตัดได้ง่ายด้วยมีด มักอยู่ในรูปแท่ง แผ่น เส้นลวด หรือเป็นผงเม็ดเล็กๆ แคดเมียมจะถูกออกซิไดซ์ช้าๆ ในอากาศที่มีความชื้นจะทำให้แคดเมียมอยู่ในรูปออกไซด์ (CdO) แคดเมียมในธรรมชาติจะรวมตัวอยู่กับกำมะถันเป็นแคดเมียมซัลไฟต์ แคดเมียมออกไซด์ หรือแคดเมียมคาร์บอเนต แคดเมียมสามารถละลายได้ดีในกรดไนตริก (HNO_3) และละลายได้อย่างช้าๆ ในกรดไฮโดรคลอริค (HCl) จากคุณสมบัติการละลายได้ดีในกรดอ่อนของแคดเมียม จึงเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตเมื่อรับเข้าไป สารประกอบแคดเมียม เช่น แคดเมียมซัลเฟต ($CdSO_4$) แคดเมียมคลอไรด์ ($CdCl_2$) และแคดเมียมไนเตรต ($Cd(NO_3)_2$) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่มีสีและละลายได้ดีในน้ำ นอกจากนี้ แคดเมียมยังสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้โดยเฉพาะเมื่อรวมกับไซยาไนด์ (cyanides) และเอมีน (amines) แคดเมียมที่พบในดินจะอยู่ในสภาพที่ละลายได้ง่ายโดยจะอยู่ในรูป Cd^{2+} เป็นส่วนใหญ่ โดยอาจจะอยู่ในรูปไอออนเชิงซ้อน (complex ion) เช่น แคตไอออน ($CdCl^+$, $CdOH^+$, $CdHCO_3^+$) แอนไอออน ($CdCl_3^-$, $CdCl_4^{2-}$, $Cd(OH)_3^-$, $Cd(OH)_4^{2-}$) และในรูปสารประกอบ เช่น CdO หรือ $CdCO_3$ หรืออาจอยู่รวมกับฟอสเฟตได้เช่นกัน (ศุภมาศ, 2540)

1.2 แหล่งกำเนิด

แคดเมียมที่เกิดจากการสลายตัวของหินและแร่ในธรรมชาตินั้น เราจะพบโลหะหนักแคดเมียมในปริมาณน้อย โดยทั่วไปจะพบแคดเมียมที่พื้นผิวโลกประมาณ 0.07-1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยเป็นองค์ประกอบของหินและมักปนอยู่กับสินแร่สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง โดยอยู่ในรูปของสินแร่กรีนอกไคต์ (greenockite; CdS) ประมาณ 0.5 ไมโครกรัมต่อกรัม และปะปนอยู่กับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แร่อื่นๆ เช่น สังกะสี ตะกั่ว ทองแดง และพบแคดเมียมอยู่ในรูปสินแร่สังกะสีประมาณร้อยละ 0.3-1.0 และอาจมากถึงร้อยละ 3 ปะปนอยู่กับสินแร่สฟาเลอไรต์ (sphalerite; ZnS) หรือคาลาไมน์ (calamine; $ZnCO_3$) (อรวรรณ, 2522)

2. ที่มาของการปนเปื้อนแคดเมียม

การปนเปื้อนแคดเมียม มี 2 เส้นทาง คือ จากธรรมชาติและมนุษย์

2.1 ธรรมชาติ

สารกลุ่มโลหะหนักสามารถที่จะแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมทั้งในบรรยากาศ พื้นแผ่นดินและพื้นน้ำ โดยสารกลุ่มโลหะหนักสามารถที่จะแพร่กระจายไปมาในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ทั้งจากพื้นดินสู่พื้นน้ำ พื้นน้ำสู่บรรยากาศ บรรยากาศสู่พื้นดิน และพื้นดินสู่บรรยากาศ เป็นต้น การปนเปื้อนสารแคดเมียมจากแหล่งธรรมชาติส่วนใหญ่มาจากการระเบิดของภูเขาไฟซึ่งจะปลดปล่อยละอองไอของแคดเมียมจำนวนมากสู่บรรยากาศ ตลอดจนการชะของฝนจนเกิดการพังทลายของหินต้นกำเนิด ปริมาณแคดเมียมที่สะสมอยู่ในธรรมชาติ มีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ เช่น ปริมาณแคดเมียมที่อยู่ในดินจะมีปริมาณมากน้อยผันแปรไปตามชนิดของหิน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของดินจะมีความแตกต่างกันตามชนิดของหินซึ่งเป็นวัตถุต้นกำเนิดดิน ซึ่งการแพร่กระจายดังกล่าวมีกระบวนต่างๆ ที่เข้ามาเกี่ยวข้องทั้งกระบวนการที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยกิจกรรมของมนุษย์ (ศุภมาศ, 2540)

2.2 มนุษย์

แคดเมียมที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งมักก่อให้เกิดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณที่มากกว่าธรรมชาติ โดยแหล่งที่มาของแคดเมียมจากกิจกรรมของมนุษย์ที่สำคัญมีหลายแหล่งด้วยกัน โดยส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมการถลุงแร่ อุตสาหกรรมการหลอม และเผาโลหะ อุตสาหกรรมแก้ว พลาสติก ปุ๋ย ซึ่งจะทำให้เกิดการปนเปื้อนในระดับสูงสู่ดิน แหล่งน้ำผิวดิน น้ำทะเล และบรรยากาศ ดังนั้น อุตสาหกรรมที่เป็นแหล่งที่มาของแคดเมียมจากกิจกรรมของมนุษย์ที่สำคัญ ได้แก่ เหมืองแร่ โรงงานถลุงแร่ซึ่งมีผลต่อการปนเปื้อนของแคดเมียม สังกะสี และตะกั่วในสิ่งแวดล้อมได้ง่ายที่สุดคืออุตสาหกรรมเหมืองแร่ โดยเฉพาะเหมืองเปิด หรือเหมืองที่ทำการเปิดหน้าดินแล้วขุดตักจากหน้าดินลงไปเป็นชั้นๆ ลดหลั่นลงมาจากยอดสุดของภูเขาลงมาสู่ส่วนล่างซึ่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จะทำให้การปนเปื้อนสามารถเกิดขึ้นจากการที่มีฝนตกและชะล้างเศษแร่ลงมาปนกับน้ำฝนแล้วไหลลงลำธารเกิดการแพร่กระจายลงสู่ส่วนต่างๆ ของธรรมชาติ ตามปกติแคดเมียมจะไม่ใช่แร่หลักในการประกอบการอุตสาหกรรมเหมืองแร่เนื่องจากในธรรมชาติมีจำนวนน้อยกว่าแร่สังกะสีและตะกั่วมาก แต่แคดเมียมมีความสัมพันธ์ในการเกิดร่วมกับสังกะสีมาก แคดเมียมในทางแร่วิทยาถือว่าเป็นเพื่อนแร่สังกะสี เมื่อที่ใดมีแร่สังกะสีเกิดขึ้นก็จะพบแร่แคดเมียมร่วมด้วยเสมอในปริมาณร้อยละ 0.1-5.0 ซึ่งปริมาณแคดเมียมจะมีมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับปริมาณสังกะสีในแร่ โดยพบว่าถ้าในแร่มีปริมาณสังกะสีสูงปริมาณแคดเมียมจะสูงตามไปด้วย ซึ่งอัตราส่วนระหว่างแคดเมียมและสังกะสีในแร่จะมีค่าตั้งแต่ 1:350 ถึง 1:100 (คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์, 2549)

3. การปนเปื้อนโลหะหนักแคดเมียม

3.1 การปนเปื้อนในดินและน้ำ

โดยปกติพื้นผิวโลกจะมีโลหะหนักสะสมอยู่ปริมาณหนึ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากการผุพังและการสลายตัวของวัตถุต้นกำเนิดดินเอง ความเข้มข้นของโลหะหนักในเปลือกโลกและในดินมีค่าผันแปรได้ตามลักษณะวัตถุต้นกำเนิด ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน เนื้อดิน และระดับความลึกของดินเป็นสำคัญ ปริมาณแคดเมียมในดินทั่วไปมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.07-1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยทั่วไปมีค่าเฉลี่ยสูงในดินฮิสโตซอลส์และค่าเฉลี่ยโดยรวมของดินที่มีการปนเปื้อนมีค่า 0.53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนั้นจากการทดลองของสถานีทดลองการเกษตรในประเทศอังกฤษพบว่า การให้ปุ๋ยฟอสเฟต หรือปุ๋ยคอกเป็นเวลา 140 ปี ทำให้ดินมีแคดเมียมเพิ่มจากปริมาณที่มีอยู่เดิม 0.51 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็น 0.77 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งแคดเมียมส่วนใหญ่มีการเคลื่อนย้ายได้น้อย เนื่องจากมีความสามารถในการยึดเกาะอยู่ในส่วนที่เป็นดินเหนียว ดังนั้นดินเหนียวจึงมีโลหะหนักแคดเมียมอยู่ในรูปที่สามารถนำไปใช้ได้ง่าย (available form) ในสารละลายดินน้อยกว่าดินที่เป็นดินทราย (Diaz and Polo, 1988) น้ำที่ชะล้างผ่านดินและน้ำใต้ดิน จึงไม่ค่อยมีการปนเปื้อนโลหะหนักแคดเมียม (Genevini *et al.,* 1984)

แคดเมียมในแหล่งน้ำธรรมชาติมีอยู่ด้วยกันหลายรูป ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ Cd^{2+} นอกจากนี้ปัจจัย เรื่อง pH และปริมาณสารอินทรีย์ ยังส่งผลให้แคดเมียมอยู่ในรูปของไอออนสารประกอบโลหะอนินทรีย์หรือโลหะอินทรีย์ แคดเมียมในแหล่งน้ำผิวดินตามธรรมชาติมีความเข้มข้นน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำทะเลจะพบแคดเมียมอยู่ระหว่าง 0.04-0.30 มิลลิกรัมต่อลิตร (ฉัตรสินี, 2545) ปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับการปนเปื้อนแคดเมียมในแหล่งน้ำ อาทิเช่น การ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทดลองของ สุนีรัตน์ และลัดดา (2548) ศึกษาการสะสมแคดเมียมในระบบทดลองซึ่งประกอบด้วย น้ำ ดิน แพลงก์ตอนพืช (*Chlorella regularis*) แพลงก์ตอนสัตว์ (*Moina macropa*) และปลาดุกบิ๊กอุย (hybrid catfish) ในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาปริมาณการสะสมแคดเมียมในระบบทดลอง หลังจากแคดเมียมเข้าสู่แหล่งน้ำ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อแคดเมียมเข้มข้น 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงสู่แหล่งน้ำของระบบทดลอง แคดเมียมลดลงจากน้ำอย่างรวดเร็วโดยภายใน 30 นาที แคดเมียมคงเหลืออยู่ในน้ำ 1.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และแคดเมียมมีการสะสมอยู่มากที่สุดในแพลงก์ตอนพืช รองลงมาคือ แพลงก์ตอนสัตว์ และปลา โดยสะสมในปริมาณ 586.18±23.37, 141.52±26.74, และ 1.54±0.15 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณแคดเมียมที่พบในสิ่งมีชีวิตในระบบทดลองกับปริมาณแคดเมียมที่พบในน้ำ พบว่าปริมาณแคดเมียมที่สะสมในแพลงก์ตอนพืชมีความสัมพันธ์มากที่สุดกับปริมาณแคดเมียมที่พบในน้ำ พืชน้ำจะสะสมโลหะหนักด้วยการดูดซับจากน้ำโดยตรงซึ่งพืชน้ำจะไม่สามารถควบคุมปริมาณโลหะหนักในตัวเองได้ และปริมาณการสะสมจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายหรือแขวนลอยอยู่ในน้ำเป็นสำคัญ รวมถึงอายุและชนิดของพืชน้ำเหล่านั้นด้วย ทั้งนี้พืชน้ำต่างชนิดกันก็จะมีการสะสมปริมาณโลหะหนักได้ไม่เท่ากัน เนื่องจากความต้องการโลหะหนัก ความสามารถในการดูดซึมโลหะหนัก รวมทั้งความคงทนต่อการขาดแคลนโลหะหนักและความเป็นพิษของโลหะหนักแตกต่างกัน อีกทั้งรูปทางเคมีของโลหะหนัก จะมีผลต่อการดูดซึมโลหะหนักของพืชด้วย โดยพบว่าพืชสามารถดูดซึมและสะสมโลหะหนักในรูปเกลืออนินทรีย์ได้ดีกว่าโลหะที่เป็นสารประกอบของกากตะกอน (Peligard, 1986)

3.2 การปนเปื้อนในมนุษย์และสัตว์

สิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิดสามารถสะสมแคดเมียมไว้ในร่างกายได้ เนื่องจากแคดเมียมมีสมบัติทางเคมีที่คล้ายกับสังกะสี ทำให้แคดเมียมสามารถเข้าไปแทนที่สังกะสีในเอนไซม์บางชนิด ด้วยเหตุนี้ทำให้เมตาบอลิซึม (metabolism) ถูกทำให้เปลี่ยนไปจากปกติ แคดเมียมสามารถเข้าไปอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ ในปริมาณที่สูงกว่าที่พบในน้ำตั้งแต่หลายร้อยเท่าจนถึงหลายพันเท่า ในปลาส่วนใหญ่จะเก็บสะสมแคดเมียมไว้ที่ตับ ลำไส้ และเหงือก ส่วนที่เหลือจำนวนน้อยเก็บไว้ที่เนื้อ โดยปลาจะเก็บสะสมแคดเมียมได้น้อยกว่าสาหร่าย และหอย ซึ่งการสะสมตัวของแคดเมียมจะมีความสัมพันธ์อย่างมากกับความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน กล่าวคือ ถ้าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน ในดินเพิ่มขึ้น การสะสมแคดเมียมในสิ่งมีชีวิตนั้นก็ลดลง การสะสมแคดเมียมในสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง เช่น หอยแครง หอยนางรม และหอยแมลงภู่ มีแคดเมียมสูงตั้งแต่ 100-1,000 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และมากกว่าการสะสมในสาหร่ายหรือใน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้าว แต่ในกรณีที่ดินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้น้อย จะทำให้สาหร่ายสามารถสะสมแคดเมียมได้มากกว่าพวกสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังถึง 4 เท่า (Chaney *et al*, 2001)

3.3 การปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม

กิจกรรมของมนุษย์ เป็นแหล่งกำเนิดของการปนเปื้อนสารแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมที่มีบทบาทสูงมากโดยเฉพาะจากการปล่อยจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสียชุมชน น้ำเสียจากเหมืองแร่ กิจกรรมเหล่านี้สามารถที่นำมาซึ่งการแพร่กระจายสู่บรรยากาศและดินได้เป็นบริเวณกว้าง และหากมีการนำวัสดุเหลือใช้หรือผลพลอยได้ที่ปนเปื้อนจากโลหะหนัก ก็เท่ากับเป็นการทำให้มีผลกระทบโดยตรงและเป็นวงกว้างมากยิ่งขึ้น ดังในปัจจุบัน พบว่ามีการนำกากตะกอนน้ำเสียไปผลิตเป็นปุ๋ย ซึ่งเป็นการแพร่กระจายของโลหะหนักสู่พื้นที่เกษตรโดยตรงก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนโลหะหนักในผลผลิตมากยิ่งขึ้น ในสภาพธรรมชาติแคดเมียมจะเคลื่อนที่ได้น้อยมาก และแคดเมียมที่พบบนพื้นผิวหน้าดินเกิดจากการที่รากพืชดูดซับแคดเมียมจากชั้นดินล่างขึ้นมาและสะสมอยู่ในต้นพืชเมื่อพืชตายและย่อยสลายแคดเมียมจะสะสมที่ผิวหน้าดิน นอกจากนี้ปริมาณแคดเมียมในดินจะมีปริมาณลดลงตามความลึก ลดลงไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีปริมาณเท่ากับที่พบในวัตถุต้นกำเนิด ซึ่งมีความแตกต่างกันตามชนิดของหินในบริเวณนั้น (Page and Bingham, 1973)

4. การสะสมของพืชเมื่อได้รับโลหะหนักแคดเมียม

พืชมีโอกาสสะสมแคดเมียมทั้งจากดิน น้ำ และอากาศ เพราะแคดเมียมสามารถเข้าสู่พืชได้ทั้งทางราก ลำต้น และใบ กระบวนการดูดซับและสะสมแคดเมียมของรากพืช อาจจะเป็นแบบ active ion absorbtion หรือ passive ion absorbtion กลไกการดูดซับแบบ passive ion absorbtion อาจดูดซับโดยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน หรือวิธีการคายน้ำ กลไกเกิดในขณะที่พืชดูดน้ำเพื่อทดแทนการคายน้ำ เมื่ออัตราการดูดไอออนเร็วเกินกว่าอัตราการคายน้ำทำให้เกิดภาวะความต่างของความเข้มข้นอย่างกะทันหันที่บริเวณรากพืช โลหะหนักจึงเคลื่อนเข้าสู่พืชได้ โดยวิธีการแพร่จากดินเข้าสู่ราก ส่วนวิธีการเคลื่อนที่ของโลหะหนักจากรากไปสู่ยอด ยังสรุปได้ไม่แน่นอน (Culter and Rains, 1974) พืชที่ปลูกบนดินที่ปนเปื้อนแคดเมียม สามารถดูดดึงแคดเมียมได้เช่นเดียวกับการดูดดึงธาตุต่างๆ ในดิน เมื่อมีการเก็บเกี่ยวผลผลิตไปจากดินก็ย่อมสูญเสียแคดเมียมไปด้วย อย่างไรก็ตามพืชต่างชนิดกัน ความสามารถดูดดึงและสะสมแคดเมียมได้แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและส่วนของพืช โดยในพืชปกติทั่วไปจะมีปริมาณแคดเมียมในมวลแห้งน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (สุนิศา, 2543)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Jung and Thornton (1996) ศึกษาปริมาณแคดเมียมและสังกะสีในดินในบริเวณรอบๆ เหมืองแร่ตะกั่ว และสังกะสีในเมืองซัมโบ ประเทศเกาหลี พบว่าดินในพื้นที่เหมืองที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร มีปริมาณสังกะสีอยู่ระหว่าง 329-25,800 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนพื้นที่ที่ไม่ทำการเกษตร พื้นที่อยู่อาศัยมีปริมาณสังกะสีน้อยกว่า 230 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณแคดเมียมในพื้นที่เหมืองอยู่ระหว่าง 0.9-38.0 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่ในพื้นที่ที่ไม่ทำการเกษตรและพื้นที่อยู่อาศัยมีปริมาณแคดเมียมน้อยกว่า 3.3 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งทั้งสังกะสีและแคดเมียมในพื้นที่รอบๆ เหมืองมีปริมาณต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับให้มีธาตุนั้นได้ในดิน

5. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสะสมโลหะหนักในดินและพืช

5.1 ลักษณะสมบัติของดิน

ลักษณะสมบัติของดินมีผลต่อการดึงดูดแคดเมียมของพืช คือ สภาพการละลายได้อันมีบทบาทที่บ่งบอกถึงสภาพการขาดแคลน หรือเป็นพิษต่อพืช หรือมีมากจนเป็นสารมลพิษในดินซึ่งปัจจัยที่ควบคุมสภาพการละลายได้ของแคดเมียม ได้แก่ สภาพกรด-ด่าง ศักย์รีดอกซ์ (redox potential) เนื้อดิน วัตถุต้นกำเนิดดิน ชนิดและปริมาณสารประกอบอินทรีย์ในดินและในสารละลายดิน ไอออนของธาตุอื่นที่มีอยู่ในสารละลายดิน ระดับความชื้นของดิน อุณหภูมิของดิน และกิจกรรมจุลินทรีย์ของดิน หากธาตุพิษเหล่านี้ยังไม่ละลายก็จะมีผลต่อสภาพแวดล้อมน้อยมาก (ศุภมาศ, 2540) การดึงดูดแคดเมียมจะลดลงเมื่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินเพิ่มโดยการเพิ่มปริมาณอินทรียวัตถุลงในดิน ปริมาณอินทรียวัตถุที่สูงในดินจะช่วยลดแคดเมียมในดินได้ เนื่องจากอินทรียวัตถุสามารถจับยึดแคดเมียมได้ดี จึงทำให้แคดเมียมจับยึดกับอินทรีย์ในดินมากขึ้นและพืชก็จะดูดดึงแคดเมียมเข้าไปได้น้อยลง และพืชที่ปลูกบนดินทรายจะสะสมแคดเมียมได้มากกว่าพืชที่ปลูกบนดินเหนียว (Chaney, 1982)

ความเป็นกรด-ด่างของดิน จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของแคดเมียมในดินโดยค่าความเป็นกรด-ด่างของดินที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้การดูดดึงแคดเมียมของพืชลดลงได้ เพราะว่าไอออนของแคดเมียมในรูปที่เปลี่ยนประจุได้และละลายน้ำได้จะมีปริมาณลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้น แคดเมียมในดินส่วนใหญ่จะละลายได้ดีในสภาพดินเป็นกรด การใส่ปูนเพิ่มความเป็นกรดเป็นด่างของดินจะลดการดูดดึงโลหะหนักของพืชได้เรียงตามลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ แมงกานีส สังกะสี นิเกิล แคดเมียม ทองแดง โครเมียม และตะกั่ว (เพื่อนจิต, 2548)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5.2 ชนิดและรูปของแคดเมียม

ธาตุพิษพวกโลหะมีลักษณะโดยทั่วไปคือ เปลี่ยนแปลงวาเลนซีอยู่เสมอในรูปไฮดรอกไซด์จะมีการละลายได้ต่ำ มีความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้สูง ชอบทำปฏิกิริยากับพวกซัลไฟด์และธาตุโลหะหนักบางตัวมีนิสัยคล้ายไอออนบวก (อรวรรณ, 2522)

5.3 ชนิดและส่วนต่างๆ ของพืช

ความเข้มข้นของแคดเมียมในพืชจะมากหรือน้อยแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดดินที่ปลูกพืช ชนิดพืช ส่วนของพืช และอายุพืช พืชแต่ละชนิดจะสะสมแคดเมียมได้ต่างกัน เนื่องจากความต้องการแคดเมียม ความสามารถในการดูดดึงแคดเมียม รวมทั้งความทนทานต่อความเป็นพิษของแคดเมียม ตัวอย่างเช่น ข้าวไรย์ ข้าวบาร์เล่ย์ และข้าวโอ๊ต จะสะสมโลหะหนักในส่วนรากมากที่สุด แคดเมียมสะสมในพืชกินใบมากกว่าในเมล็ด Chaney *et al.* (2000) รายงานค่าความเข้มข้นของแคดเมียมในข้าวโพดมีปริมาณลดหลั่นกันไปดังนี้ ใบ ต้น ฝัก เพื่อนจิต (2548) รายงานการวิจัยการผสมแคดเมียมลงไปในดิน 7.0 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัม แล้วทำการเพาะปลูกข้าว ซึ่งข้าวจะดูดซับแคดเมียมเข้าไปสะสมไว้ในเมล็ดข้าวถึง 4.13 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกิโลกรัม

6. แคดเมียมในดินนาของประเทศไทย (ทัศนีย์, 2550; ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2547)

การปนเปื้อนของแคดเมียมในดินและน้ำที่ จังหวัดตาก ได้มีการร่วมมือระหว่างสถาบันการจัดการทรัพยากรน้ำนานาชาติร่วมกับกรมวิชาการเกษตร ทำการศึกษาการปนเปื้อนแคดเมียมในดินตั้งแต่ปี พ.ศ.2541-2546 การศึกษาพบว่าดินมีการสะสมแคดเมียมในปริมาณสูง แต่ไม่แน่ใจว่าการปนเปื้อนเกิดจากบริเวณเหมืองแร่สังกะสี หรือกิจกรรมการทำเหมือง ซึ่งเป็นการปนเปื้อนไปกับน้ำที่ไปท่วมขังนาข้าว แคดเมียมก็จะเคลื่อนย้ายไปยังข้าว การศึกษาช่วงแรก ปี 2541-2543 ในพื้นที่ด้านตะวันออกของ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก บริเวณแปลงนาบ้าน พะเต๊ะ ซึ่งอยู่ใกล้บริเวณแหล่งแร่สังกะสี พบปริมาณแคดเมียมในดินสูงกว่าค่ามาตรฐานของ EU (ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ถึง 1,800 เท่า และพบว่าร้อยละ 95 ของเมล็ดข้าวที่สุ่มเก็บ มีแคดเมียมสะสมในปริมาณที่มากกว่าค่าที่พบในข้าวที่ปลูกในประเทศไทยบริเวณอื่น สูงที่สุดถึง 100 เท่า ซึ่งปริมาณแคดเมียมที่พบนี้มีค่าในพิสัยเดียวกับข้าวที่ก่อโรคอิไต-อิไต (Itai Itai) ในประเทศญี่ปุ่นหากบริโภคติดต่อกันเป็นเวลานาน ช่วงที่สอง ปี 2544-2546 ได้ขยายพื้นที่ศึกษามาตามลุ่มน้ำแม่ตาวในบริเวณ ตำบลแม่ตาว ซึ่งเป็นบริเวณท้ายน้ำจากบริเวณแรก พบว่าปริมาณการปนเปื้อนแคดเมียมในดินมีค่าสูงถึง 72 เท่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ของค่ามาตรฐาน EU ขณะที่กว่าร้อยละ 80 ของตัวอย่างข้าวมีค่าของแคดเมียมสูงกว่าค่ามาตรฐานของญี่ปุ่นและองค์การอาหารและเกษตร (น้อยกว่า 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และพบความเข้มข้นของแคดเมียมอยู่ระหว่าง 0.040-0.011 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในสัตว์น้ำ 5 ชนิด ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด ถือว่าปลอดภัยต่อผู้บริโภค ทีมนักวิจัยกล่าวถึงสาเหตุของการปนเปื้อนแคดเมียมในดินว่า “น่าจะเกิดจากการที่ฝนตกชะหน้าดินที่อุดมด้วยแร่สังกะสีและแคดเมียม ลงสู่ต้นน้ำของลำน้ำธรรมชาติ คือ ลุ่มน้ำแม่ตาว ในกรณีนี้ทำให้เกิดการสะสมในตะกอนท้องน้ำ เมื่อปล่อยน้ำเข้าสู่แปลงเกษตร ทำให้เกิดการแพร่กระจายต่อ ๆไป และสรุปว่าไม่มีหลักฐานเพียงพอที่จะกล่าวว่าสารแคดเมียมมาจากเหมืองสังกะสีที่เปิดทำการอยู่ในบริเวณที่พบการปนเปื้อนนี้” นอกจากนี้ยังมีการรายงานพบการปนเปื้อนของแคดเมียมและสังกะสีในดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่มของลุ่มน้ำแม่กุ อ.แม่สอด จ.ตาก รัฐบาล ได้ตั้งคณะทำงานเฉพาะกิจเพื่อตรวจสอบได้แก่ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและเหมืองแร่ (กระทรวงอุตสาหกรรม) สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรมทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรน้ำบาดาล กรมทรัพยากรน้ำ (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม) กรมประมง และกรมวิชาการการเกษตร (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์) และกรมควบคุมโรคและกรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุขในขณะนั้น แก้ไขปัญหาการปนเปื้อนของแคดเมียมในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาวและลุ่มน้ำแม่กุ โดยมีปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ขณะนั้นเป็นประธาน และใช้เวลาศึกษาตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์-กรกฎาคม พ.ศ. 2547 และรายงานผลการตรวจสอบ โดยกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ ว่าเกิดจากกระบวนการธรรมชาติไม่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมเหมืองแร่ แต่เกิดจากกระบวนการผุพังสลายตัวตามธรรมชาติ เนื่องจากทั้ง 2 ลุ่มน้ำต่างก็มีลำน้ำสาขาไหลมาจากยอดเขาเดียวกันที่เป็นแหล่งศักยภาพให้แคดเมียม และดินบริเวณลุ่มน้ำแม่กุ ไม่มีความเกี่ยวเนื่องสัมพันธ์กับกิจกรรมเหมืองแร่

7. ข้าว

7.1 แหล่งที่มาและประวัติของข้าว

ข้าวเป็นพืชอาหารที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก โดยเฉพาะประเทศในภูมิภาคเอเชียที่นิยมรับประทานข้าวเป็นอาหารประจำวันมากกว่าในภูมิภาคอื่นๆ ของโลก การผลิต บริโภคและการค้าข้าวส่วนใหญ่จึงกระจุกตัวอยู่ในทวีปเอเชีย แต่ข้าวที่ผลิตได้ส่วนใหญ่จะใช้ในการบริโภคภายในประเทศ ทำให้มีข้าวเพียงร้อยละ 6 เท่านั้นที่เข้าสู่ตลาดการค้าข้าวระหว่างประเทศ โดยประเทศที่มีบทบาทมากที่สุดในการส่งออกข้าว คือประเทศไทย เวียดนาม อินเดีย จีนและพม่า โดย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ไทยส่งออกข้าวปีละประมาณ 7 ล้านตัน เป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 30 ของการส่งออกข้าวทั้งหมดทั่วโลก (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2556)

สายพันธุ์ของพืชตระกูลข้าวที่มีอยู่บนโลกนี้มีมากถึง 120,000 สายพันธุ์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ *Oryza savita* ที่นิยมเพาะปลูกในทวีปเอเชีย และ *Oryza glaberrima* ที่นิยมเพาะปลูกในทวีปแอฟริกาแต่ข้าวที่ปลูกและซื้อขายกันในตลาดโลกเกือบทั้งหมดจะเป็นข้าวจากทวีปเอเชีย แบ่งเป็น 3 กลุ่มตามลักษณะและพื้นที่ปลูกได้ดังนี้ (สงกรานต์, 2544)

7.1.1 ข้าวอินดิกา (Indica) เป็นข้าวที่มีลักษณะเม็ดเรียวยาวรี ลำต้นสูง ตั้งชื่อมาจากแหล่งที่ค้นพบครั้งแรกในประเทศอินเดีย เป็นข้าวที่นิยมเพาะปลูกในทวีปเอเชียเขตมรสุมตั้งแต่ จีน เวียดนาม ฟิลิปปินส์ ไทย อินโดนีเซีย ไปจนถึงอินเดีย และศรีลังกา แพร่กระจายไปทั่วเขตอุษาอาคเนย์ตั้งแต่หลัง พ.ศ. 1000 เขตลุ่มน้ำอิระวดีและต่อมาแพร่ขยายเพาะปลูกในทวีปอเมริกา โดยเฉพาะในเมืองไทยข้าวอินดิกานิยมเพาะปลูก ในบริเวณที่ราบลุ่มตอนใต้ของแม่น้ำเจ้าพระยาเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วแทนข้าวเหนียวที่เคยปลูก ซึ่งคนไทยสมัยนั้นเรียกข้าวอินดิกาที่มาจากต่างประเทศว่า “ข้าวของเจ้า” แล้วเรียกกันสั้นลงเหลือเพียง “ข้าวเจ้า” มาจนถึงทุกวันนี้

7.1.2 ข้าวจาปอนิกา (Japonica) เป็นข้าวเมล็ดป้อมรีมีแหล่งกำเนิดจากทางภาคเหนือแล้วผ่านมาทางลุ่มแม่น้ำโขง ในสมัยก่อนพุทธศตวรรษที่ 20 หลังจากนั้นลดจำนวนลงไปแพร่หลายในเขตอบอุ่นที่ญี่ปุ่น เกาหลี รัสเซีย ยุโรป และอเมริกา

7.1.3 ข้าวจาวานิกา (Javanica) เป็นข้าวลักษณะเมล็ดป้อมใหญ่สันนิษฐานว่า เป็นข้าวพันธุ์ผสม ระหว่างข้าวอินดิกา และจาปอนิกานิยมเพาะปลูกในอินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ ไต้หวัน หมู่เกาะริวกิว และญี่ปุ่น แต่ไม่ค่อยได้รับความนิยมนักเพราะให้ผลผลิตต่ำ ประเทศต่างๆในโลกต่างก็มีการพัฒนาสายพันธุ์ข้าวใหม่เพิ่มพื้นที่การเพาะปลูกข้าวและวิธีการปลูกข้าวให้ได้ปริมาณผลผลิตเพิ่มขึ้น ในขณะที่ตำนานเกี่ยวกับข้าวของแต่ละชาติต่างก็มีประวัติศาสตร์อันยาวนาน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7.2 พันธุ์ข้าวที่ใช้ในการศึกษา

ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

ข้าวหอมมะลิหรือข้าวดอกมะลิ เป็นข้าวที่มีความไวต่อช่วงแสง สามารถปลูกได้เฉพาะนาปีเท่านั้น ส่วนชื่อเรียกว่าข้าวหอมมะลินั้นมีที่มาจากสีของข้าวที่ขาวเหมือนดอกมะลิ แต่มีกลิ่นหอมเหมือนใบเตย ไม่ได้หมายความว่าข้าวนั้นหอมเหมือนมะลิ ลักษณะที่สำคัญของข้าวหอมมะลิ คือ เมื่อหุงหรือนึ่งสุกแล้วเมล็ดข้าวจะอ่อนนิ่มมากกว่าข้าวเจ้าทั่วไป แต่ร่วนน้อยกว่าและมีกลิ่นหอม ข้าวที่ปลูกเพื่อใช้เป็นข้าวหอมมะลิมี 2 พันธุ์ ได้แก่ ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์ กข 15 ซึ่งข้าวพันธุ์ กข 15 ก็คือข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่นำไปอาบรังสีแกมม่าทำให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ประมาณร้อยละ 4-6 (วิไลภรณ์, 2552)

8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศิริลักษณ์ (2548) ศึกษาการปนเปื้อนของแคดเมียมในดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่มของลุ่มน้ำแม่กุ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแคดเมียมและสังกะสีในดินตัวอย่าง 2 รูปแบบ คือ ปริมาณโลหะหนักทั้งหมด และปริมาณโลหะหนักในรูปที่พืชสามารถดูดซึมได้ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES) ทั้งนี้พบว่า ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีทั้งหมดในตัวอย่างมีค่าระหว่าง 0.42-101.69 และ 29.34-2, 347.74 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.93 และ 209.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าปริมาณแคดเมียมในดินส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีจำนวน 2 ตัวอย่างที่มีแคดเมียมทั้งหมดปริมาณสูงมาก (สูงกว่า 80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งทั้งสองตัวอย่างนี้อยู่ทางด้านทิศตะวันออกของพื้นที่ศึกษา Anongnat *et al*. (2012) ได้ประเมินการปนเปื้อนแคดเมียมในนาข้าว จากครัวเรือนที่บริโภคข้าวจำนวน 23 ครัวเรือนในหมู่บ้านพ๊ะเด๊ะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก พบว่าความเข้มข้นแคดเมียมในเมล็ดข้าวเปลือกมีตั้งแต่ 0.04-1.75 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมากกว่าครึ่งหนึ่งของตัวอย่างข้าวทั้งหมดที่ศึกษามีระดับแคดเมียมสูงกว่ามาตรฐาน CODEX

ภาราดา (2548) ศึกษาการกระจายตัวของแคดเมียมในตะกอนท้องน้ำและตะกอนแขวนลอยจากห้วยแม่ตาว ห้วยแม่กุ และห้วยหนองเขียว รวมถึงการวิเคราะห์สัดส่วนทางพันธะที่สำคัญของแคดเมียมในตัวอย่างตะกอนท้องน้ำเพื่อบ่งชี้ศักยภาพของแคดเมียมที่จะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ ผลการศึกษาพบว่า ห้วยแม่ตาวซึ่งรับน้ำโดยตรงจากดอยผาแดงมีปริมาณ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แคดเมียมตะกอนท้องน้ำและตะกอนแขวนลอยมากกว่าห้วยอื่น ขณะที่ห้วยหนองเขียวพบปริมาณโลหะแคดเมียมต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาการศึกษาสัดส่วนทางพันธะของแคดเมียมในห้วยแม่ตาว พบว่า อยู่ในรูปที่สามารถแตกตัวได้ง่ายและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูง ส่วนห้วยหนองเขียว พบว่า ส่วนมากอยู่ในรูปพันธะที่แตกตัวยาก หลักฐานดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าห้วยแม่ตาวเป็นห้วยที่มีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนแคดเมียมในพืชและสิ่งมีชีวิตมากกว่าห้วยอื่นๆ Pramoon (2005) ศึกษาความเป็นพิษของแคดเมียมต่อการเจริญเติบโตของผักบุ้ง โดยศึกษาจากการสะสมของแคดเมียมในผักบุ้งที่ปลูกในน้ำที่มีการปนเปื้อนของแคดเมียมในระยะยาวที่ความเข้มข้นต่างๆ และการสะสมแคดเมียมในผักบุ้งซึ่งปลูกในแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนด้วยแคดเมียมปริมาณสูงอย่างกะทันหันในระยะเวลาสั้น ผลการศึกษาความเป็นพิษในการเพาะปลูก 30 วัน พบว่าแคดเมียมความเข้มข้น 7.6 มิลลิกรัมต่อลิตรปลูกผักบุ้งได้ แต่ที่ความเข้มข้น 59.1 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดอาการใบเหลือง และผักตาย ส่วนในการปลูกระยะยาว 130 วัน พบว่าผักบุ้งมีผลผลิตลดลงตามธรรมชาติ แม้ในแปลงควบคุมที่ไม่มีการเติมแคดเมียมเลย ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 0.053 มิลลิกรัมต่อลิตรมีการเจริญเติบโตปกติ ขณะที่ความเข้มข้น 0.446 มิลลิกรัมต่อลิตรพืชจะเริ่มตายหลังจากปลูกไปแล้ว 40 วัน ที่ความเข้มข้นแคดเมียมต่ำไม่เกิน 0.053 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแคดเมียมสะสมมากในราก ขณะที่ในใบและลำต้นมีค่าใกล้เคียงกัน

Karnchanawong *et al.* (2002) ทำการศึกษาระดับการปนเปื้อนของโลหะหนักในคะน้า กะหล่ำปลี หัวผักกาด และข้าว ในแปลงทดลองระดับห้องปฏิบัติการ ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้น้ำทิ้งของระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนในการปลูกพืช ผลการศึกษาพบปริมาณสังกะสีและทองแดงมากกว่าแคดเมียมและตะกั่วในทุกแปลงเพาะปลูก และพบปริมาณโลหะหนักในข้าวมากกว่าพืชชนิดอื่น ยุทธชัย และคณะ (2545) ศึกษาการปนเปื้อนของตะกั่วและแคดเมียมในดิน น้ำ และพืชบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะมูลฝอย จังหวัดสุพรรณบุรี โดยสุ่มเก็บตัวอย่างดิน น้ำและพืชจำนวน 2 ครั้งในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งใน 2 บริเวณคือ บริเวณที่มีการฝังกลบขยะมูลฝอยและพื้นที่โดยรอบ พบการปนเปื้อนตะกั่วและแคดเมียมในน้ำชะขยะมีค่าอยู่ระหว่าง
4.01-76.25ไมโครกรัมต่อลิตร และ 0.44-10.88 ไมโครกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปริมาณการปนเปื้อนตะกั่วและแคดเมียมโดยเฉลี่ยในดินรอบบริเวณฝังกลบขยะมูลฝอยเท่ากับ 3.51 และ 0.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ และในน้ำเท่ากับ 5.13 และ 0.57 ไมโครกรัมต่อลิตรตามลำดับ พบว่าการปนเปื้อนของโลหะหนักบริเวณพื้นที่ฝังกลบขยะมูลฝอยจะพบเฉพาะดินบนที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตรเท่านั้น ในส่วนการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำใต้ดิน พบการปนเปื้อนตะกั่วและแคดเมียมในน้ำจากบ่อตรวจสอบคุณภาพน้ำมีปริมาณสูงสุดในช่วงฤดูฝนมีค่าเท่ากับ 10.01 และ 0.51 ไมโครกรัมต่อลิตรตามลำดับ แต่การปนเปื้อนตะกั่วและแคดเมียมในสาหร่าย จากบ่อตรวจสอบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คุณภาพน้ำในช่วงฤดูแล้งมีค่าสูงที่สุดคือเท่ากับ 1.11 และ 0.09 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ Chen (1992) ศึกษาการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนักในเมล็ดและรากของข้าวจากแหล่งต่าง ๆ ในประเทศญี่ปุ่นที่มีการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนักมากน้อยแตกต่างกัน พบว่าความเข้มข้นสูงสุดของสารหนู ทองแดง แคดเมียม สารปรอท ตะกั่ว และสังกะสี ในเมล็ดข้าวมีค่าเท่ากับ 0.2, 6.0, 5.2, 0.26, 1.0 และ 60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และความเข้มข้นสูงสุดของสารหนู แคดเมียม ทองแดง และสังกะสีในรากข้าว เท่ากับ 1,182, 97, 560 และ 4,510 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งความเข้มข้นของธาตุโลหะหนักในข้าวขึ้นอยู่กับปริมาณการปนเปื้อนและแหล่งของการปนเปื้อน Asami (1997) รายงานระดับของแคดเมียมที่ยอมรับให้มีได้ในเมล็ดข้าวและในดินในประเทศญี่ปุ่นและจีน คือ 1.0 และ 0.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับและกำหนดปริมาณความเข้มข้นของทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี ในดินที่มีน้ำขังของญี่ปุ่นคือ 125 100 400 และ 150 มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัมตามลำดับ

9. ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

9.1 ข้อมูลทั่วไป

ตำบลพระธาตุผาแดง เป็นตำบลที่ตั้งอยู่ในเขตการปกครองของอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก มีจำนวนหมู่บ้านทั้งสิ้น 6 หมู่บ้าน ตำบลพระธาตุผาแดงตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกของที่ว่าการอำเภอแม่สอด ทิศเหนือจรดตำบลแม่ปะ ทิศใต้จรดตำบลแม่กุ ทิศตะวันออกจรดตำบลพระวอและทิศตะวันตกจรดตำบลแม่ตาว มีจำนวนประชากรทั้งสิ้น 6,089 คน

ตำบลแม่ตาว เป็นตำบลที่ตั้งอยู่ในเขตการปกครองของอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก มีจำนวนหมู่บ้านทั้งสิ้น 6 หมู่บ้าน ตำบลแม่ตาวตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกของที่ว่าการอำเภอแม่สอด ทิศเหนือจรด ตำบลท่าสายลวด ทิศใต้จรดตำบลแม่กุ ทิศตะวันออกจรดตำบลพระธาตุผาแดงและทิศตะวันตกจรดแม่น้ำเมย มีประชากรทั้งสิ้น 6,529 คน (สำนักงานจังหวัดตาก, 2555)

9.2 ที่ตั้งของพื้นที่ศึกษา

ลุ่มน้ำห้วยแม่ตาว เป็นลุ่มน้ำขนาดเล็กมีพื้นที่ประมาณ 29.7 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 18,582 ไร่ พื้นที่ลุ่มน้ำอยู่ในช่วงความสูงประมาณ 280-985 เมตรจากระดับน้ำทะเล ความลาดชันเฉลี่ยของพื้นที่ประมาณร้อยละ 16.6 หรือ 9.1 องศา ภายในพื้นที่ลุ่มน้ำมีทางน้ำธรรมชาติ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ต่างๆ ได้แก่ ห้วยแม่ตาว ห้วยแม่ตาวแง่ขวา ห้วยปาปู (ปัจจุบัน ห้วยปาปูถูกเบี่ยงเบนออกจากเส้นทางเดิมเล็กน้อย เพราะอยู่ติดกับบ่อกักเก็บตะกอนหางแร่ของเหมืองผาแดง) ห้วยแม่ตาวแง่ซ้าย และห้วยโป่ง รูปแบบของลำธารเป็นแบบใบไม้ มีความหนาแน่นการระบายน้ำ เท่ากับ 1.6 ตารางกิโลเมตร และมีความหนาแน่นของลำธาร เท่ากับ 0.8 สายต่อตารางกิโลเมตร (คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์, 2549)

9.3 ลักษณะภูมิประเทศ

สภาพโดยทั่วไปเป็นเทือกเขาสูงทางทิศตะวันออก พื้นที่ต่อเนื่องทางทิศตะวันตกเป็นที่ราบตะกอนเชิงเขา (colluvium) และที่ราบตะกอนน้ำพา (alluvial plain) บริเวณเทือกเขามียอดเขาสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 350 - 650 เมตร โดยมีที่ราบแคบๆ ระหว่างหุบเขาเพียงเล็กน้อย พื้นที่ราบตะกอนเชิงเขามีลักษณะเป็นที่ราบลอนคลื่นสูงๆ ต่ำๆ ติดต่อกันไปแล้วค่อยๆ ลาดต่ำไปทางทิศตะวันตกสู่แม่น้ำเมย สำหรับพื้นที่ราบต่ำซึ่งเป็นที่ราบตะกอนน้ำพามีการใช้ประโยชน์เป็นพื้นที่นาข้าว และบางส่วนเปลี่ยนเป็นพื้นที่ปลูกไร่อ้อย ส่วนที่ดอนจะปลูกข้าวไร่และพืชไร่จำพวกข้าวโพด ดังแสดงในภาพที่ 1 (สำนักงานจังหวัดตาก, 2555)

9.4 ลักษณะภูมิอากาศ

พื้นที่ศึกษา ตั้งอยู่ในส่วนตะวันตกของพื้นที่จังหวัดตาก ซึ่งจังหวัดตาก มีเทือกเขาถนนธงชัยเป็นตัวกั้นแบ่งกลางจังหวัดทำให้ภูมิอากาศของจังหวัดตากมีลักษณะแตกต่างกัน ทำให้พื้นที่ ส่วนตะวันตกของจังหวัดได้รับความชื้นจากลมมรสุมอย่างเต็มที่ ทำให้มีปริมาณฝนตกมากกว่าพื้นที่ฝั่งตะวันออก สภาพอากาศโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ฤดู คือ ฤดูร้อน เริ่มตั้งแต่กลางเดือนกุมภาพันธ์เป็นต้นไป จนถึงกลางเดือนพฤษภาคม ฤดูฝน เริ่มตั้งแต่กลางเดือนพฤษภาคมเป็นต้นไป จนถึง เดือนตุลาคม โดยฝนจะตกทางด้านตะวันตกมากกว่าด้านตะวันออก เนื่องจากอยู่ในเขตอิทธิพลของมรสุมและดีเปรสชั่น นอกจากนี้ด้านตะวันตกมีพื้นที่ป่าไม้สูงกว่าด้วย ทำให้เก็บความชุ่มชื้นได้เป็นอย่างดี และฤดูหนาว เริ่มตั้งแต่เดือนตุลาคมเป็นต้นไป จนถึง เดือนกุมภาพันธ์ อากาศจะหนาวจัดในช่วงเดือนธันวาคมถึงเดือนมกราคม สำหรับปริมาณน้ำฝนโดยเฉลี่ยของจังหวัดตาก ในปี 2550 อยู่ในช่วง 1,203.1 มิลลิเมตร ตกหนักที่สุดวัดได้ 99.8 มิลลิเมตร จำนวนวันฝนตก 21 วันต่อเดือน ในเดือนพฤษภาคม และตกน้อยที่สุด 0.3 มิลลิเมตร จำนวนวันที่ฝนตก 2 วัน ในเดือนพฤศจิกายน (สำนักงานจังหวัดตาก, 2555)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

9.5 การใช้ประโยชน์ที่ดิน

จากข้อมูลของกรมพัฒนาที่ดินจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ศึกษาเป็น 4 ประเภทได้แก่

1) พื้นที่ป่าไม้ พบอยู่ทางฝั่งตะวันออกของพื้นที่ โดยอยู่ในเขตป่าสงวนแห่งชาติ ป่าแม่สอดมีสภาพเป็นพื้นที่ป่าเบญจพรรณ สภาพพื้นที่แห้งแล้ง ดินตื้น เนื้อดินเป็นดินร่วนปนทรายหรือดินลูกรังที่มีความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำ ทำให้ต้นไม้มีขนาดเล็ก แคระแกร็น บางแห่งมีการบุกรุกทำลายป่าทำให้ป่าเสื่อมโทรม จึงมีการปลูกป่าทดแทนขึ้นใหม่ในรูปสวนป่า พันธุ์ไม้ที่ปลูกได้แก่ ไม้สัก เป็นต้น

2) พื้นที่เกษตรกรรม พบอยู่ทางฝั่งตะวันตก จัดเป็นประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินส่วนใหญ่ในเขตพื้นที่ประกอบด้วย นาข้าวทั้งบริเวณที่ราบและที่ดอน โดยที่ดอนเป็นการทำนาแบบขั้นบันได วิธีการทำนาเป็นแบบนาดำ อาศัยน้ำฝนและน้ำจากคลองส่งน้ำซึ่งทดน้ำมาจากห้วยแม่ตาวและมีการปลูกถั่วเหลืองหมุนเวียนในฤดูแล้ง ส่วนบริเวณพื้นที่ลาดเชิงเขาส่วนใหญ่จะปลูกข้าวโพด

3) พื้นที่ชุมชน ชุมชนที่ตั้งอยู่เป็นชาวเขาเผ่ากะเหรี่ยงประกอบด้วย บ้านแม่ตาวใหม่ตั้งอยู่ทิศตะวันตก บ้านถ้ำเสือตั้งอยู่ทางทิศเหนือ บ้านหนองน้ำเขียวตั้งอยู่ทางด้านทิศตะวันออกเฉียงใต้ บ้านพะเด๊ะตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ บ้านแม่กุเหนือบางส่วนตั้งอยู่ทางด้านทิศตะวันตกเฉียงใต้

4) พื้นที่สาธารณะประโยชน์ คือทางหลวงจังหวัดหมายเลข 1090 โดยทางด้านทิศตะวันตกเป็นถนนเชื่อมระหว่างอำเภอแม่สอดกับอำเภออุ้มผาง จังหวัดตาก นอกจากนี้ยังมีเส้นทางคอนกรีต ทางลูกรัง และทางดิน ที่แยกเข้าไปตามชุมชนต่างๆ สำหรับทางน้ำผิวดินที่ปรากฏในบริเวณพื้นที่ศึกษา ประกอบด้วย ห้วยแม่ตาว ห้วยแม่กุ และห้วยหนองเขียว (ธนัญพร, 2554)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(ก)

(ข)

ภาพที่ 1 ลักษณะภูมิประเทศบางส่วนของพื้นที่ศึกษา (ก) ตำบลพระธาตุผาแดงและ (ข) ตำบลแม่ตาว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์การสำรวจดินและเก็บตัวอย่าง

1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างดินและพืช

1.2 เครื่อง GPS (Global Positioning System) 1 เครื่อง พร้อมป้ายระบุตำแหน่ง

1.3 แผนที่ลุ่มน้ำตาว อ.แม่สอด จ.ตาก (มาตราส่วน 1: 50,000)

1.4 อุปกรณ์ที่จำเป็นในการสำรวจดินและเก็บตัวอย่าง

2. อุปกรณ์การวัดและวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

2.1 เครื่องวิเคราะห์โลหะแคตไอออน (atomic absorption spectrophotometer; AAS)

2.2 เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

2.3 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ไนโตรเจน (Micro Kjeldahl distillation apparatus)

2.4 เครื่องชั่ง (balance)

2.5 ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ (oven)

2.6 เคมีภัณฑ์เกรดระดับห้องปฏิบัติการ (analar grade reagent) ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างดินและพืช

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ

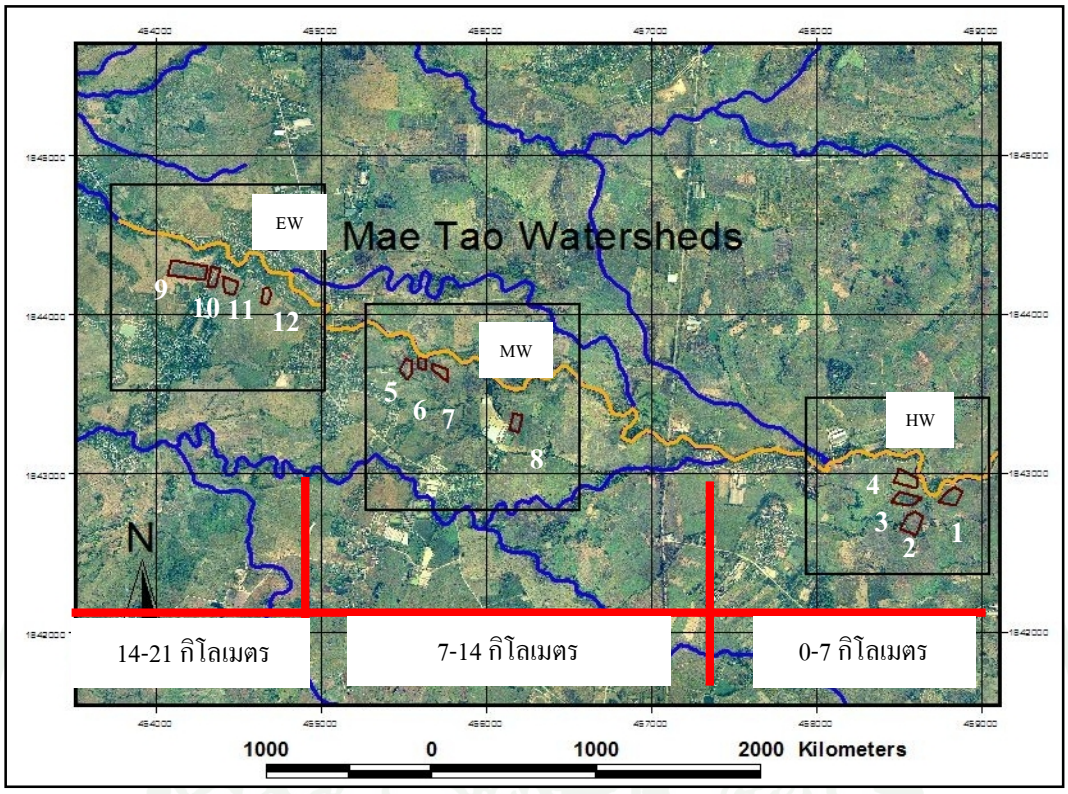
1. การกำหนดพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา ได้แก่พื้นที่ปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ใกล้เคียงตลอดลำน้ำของเกษตรกรที่อาศัยน้ำจากลำน้ำแม่ตาว บนพื้นที่ตำบลแม่ตาว ตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก โดยกำหนดแปลงที่ต้องการศึกษาจำนวน 12 แปลง ดังนี้

1_{HW} = แปลงปลูกข้าวบนพื้นที่หมู่ 4 ตำบลพระธาตุผาแดงห่างจากลำน้ำ 60.00 เมตร
2_{HW} = แปลงปลูกข้าวบนพื้นที่หมู่ 4 ตำบลพระธาตุผาแดงห่างจากลำน้ำ 100.00 เมตร
3_{HW} = แปลงปลูกข้าวบนพื้นที่หมู่ 4 ตำบลพระธาตุผาแดงห่างจากลำน้ำ 80.50 เมตร
4_{HW} = แปลงปลูกข้าวบนพื้นที่หมู่ 4 ตำบลพระธาตุผาแดงห่างจากลำน้ำ 50.60 เมตร
5_{MW} = แปลงปลูกข้าวบนพื้นที่หมู่ 3 ตำบลแม่ตาวห่างจากลำน้ำ 75.60 เมตร
6_{MW} = แปลงปลูกข้าวบนพื้นที่หมู่ 3 ตำบลแม่ตาวห่างจากลำน้ำ 63.40 เมตร
7_{MW} = แปลงปลูกข้าวบนพื้นที่หมู่ 3 ตำบลแม่ตาวห่างจากลำน้ำ 142.80 เมตร
8_{MW} = แปลงปลูกข้าวบนพื้นที่หมู่ 3 ตำบลแม่ตาวห่างจากลำน้ำ 275.50 เมตร
9_{EW} = แปลงปลูกข้าวบนพื้นที่หมู่ 1 ตำบลแม่ตาวห่างจากลำน้ำ 105.00 เมตร
10_{EW} = แปลงปลูกข้าวบนพื้นที่หมู่ 1 ตำบลแม่ตาวห่างจากลำน้ำ 90.00 เมตร
11_{EW} = แปลงปลูกข้าวบนพื้นที่หมู่ 1 ตำบลแม่ตาวห่างจากลำน้ำ 80.00 เมตร
12_{EW} = แปลงปลูกข้าวบนพื้นที่หมู่ 1 ตำบลแม่ตาวห่างจากลำน้ำ 100.10 เมตร

ทำการจัดกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าวออกเป็น 3 กลุ่ม โดยใช้ความยาวลำน้ำแม่ตาวเป็นหลัก กำหนดให้พื้นที่ต้นน้ำ (head watershed area; HW) อยู่ในช่วง 0-7 กิโลเมตรของความยาวลำน้ำ พื้นที่กลางน้ำ (middle watershed area; MW) อยู่ในช่วง 7-14 กิโลเมตรของความยาวลำน้ำ และพื้นที่ปลายน้ำ (end of watershed area; EW) อยู่ในช่วง 14-21 กิโลเมตรของความยาวลำน้ำ ดังภาพที่ 2 ทำการเก็บตัวอย่างดินพร้อมระบุพิกัดในการเก็บตัวอย่างด้วย GPS โดยแบ่งพื้นที่ออกเป็น 4 แปลง ภายในแต่ละพื้นที่ (ตารางผนวกที่ 1, 2 และ 3)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 2 พื้นที่ปลูกข้าวบริเวณใกล้เคียงลำน้ำแม่ตาว 3 กลุ่ม คือ พื้นที่ต้นน้ำ (HW) กลางน้ำ (MW) และปลายน้ำ (EW)

2. การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

สุ่มเก็บตัวอย่างดิน (random sampling) ให้ทั่วแปลงประมาณ 15 จุด ขุดหลุมเป็นรูปตัว V ลึกประมาณ 15 เซนติเมตร จากนั้นใช้พลั่วแซะดินบริเวณข้างหลุมหนาประมาณ 1.5 เซนติเมตร แล้วปาดดินทั้งสองข้างของพลั่วทิ้งเก็บส่วนกลางของพลั่วใส่ถังพลาสติก ผสมดินในถังที่เก็บจากทุกจุดให้เข้ากันแล้วแบ่งดินออกเป็น 4 ส่วน เลือก 1 ส่วน ประมาณ 0.5 กิโลกรัม ใส่ถุงพลาสติกรัดปากถุงจากนั้นนำดินที่เก็บจากแปลงทดลองไปผึ่งให้แห้งในที่ร่ม จากนั้นบดให้ละเอียดและผสมคลุกเคล้าดินให้มีความสม่ำเสมอ นำดินส่วนหนึ่งมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 และ 2 มิลลิเมตร บรรจุดินลงถุงพลาสติกเพื่อนำไปสู่กระบวนการวิเคราะห์สมบัติของดินต่อไป ทำการเก็บตัวอย่างดิน 2 ครั้ง คือดินก่อนการเพาะปลูก และหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.1 การวิเคราะห์สมบัติดินก่อนปลูก - หลังเก็บเกี่ยว

1) พีเอชดิน (soil pH) วัดโดยใช้ pH meter อัตราส่วนระหว่างดินต่อน้ำเท่ากับ 1:1 (Sparks *et al.,* 1996)

2) อินทรียวัตถุ (organic matter; OM) โดยวิธี Walkley and Black Titration (Walkley and Black, 1934)

3) ฟอสฟอรัสเป็นประโยชน์ (available P) สกัดดินโดยใช้ Bray II และวิเคราะห์ปริมาณโดยวิธีเทียบสี (colorimetric method) แล้วนำไปวัดด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Sparks *et al.,* 1996)

4) โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K) สกัดดินโดยใช้ 1N CH_3COONH_4 ที่ pH 7 แล้วนำไปวัดด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (Sparks *et al.,* 1996)

5) แคดเมียมที่สกัดได้ด้วย EDTA โดยวิธีของ Amacher (1996) ด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer รุ่น AA-7000 Shimadzu

3. การเก็บและการวิเคราะห์ตัวอย่างข้าว

3.1 เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว

1) เก็บข้อมูลความสูงของต้นข้าว

วัดการเจริญเติบโตของต้นข้าวด้านความสูง โดยวัดจากโคนต้นจนถึงปลายยอดข้าว ในแต่ละแปลงสุ่มมาแปลงละ 25 ต้น (พื้นที่ 1 ตารางเมตร) ในทุกพื้นที่ปลูกข้าว ที่อายุ 45 (ระยะการแตกกอ) 90 วัน (ระยะการออกดอกให้ผลผลิต) และ 120 วัน (ระยะเก็บเกี่ยวผลผลิต)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2) น้ำหนักส่วนเหนือดินของต้นข้าว

น้ำหนักส่วนเหนือดินประกอบไปด้วยลำต้นและใบข้าว

3) ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตข้าว

เก็บเกี่ยวผลผลิตเมื่อต้นข้าวอายุ 120 วัน

3.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างพืช

นำตัวอย่างข้าวมาแบ่งออกเป็นส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ส่วนเหนือดินที่อายุ 45 90 และ 120 วันหลังปักดำและเมล็ด (ข้าวสาร แกลบ) บดจนละเอียดและชั่งตัวอย่างพืช 0.2 กรัม ใส่ในหลอดทดลองขนาด 75 มิลลิลิตร เติม HNO_3 และ $HClO_4$ (อัตราส่วน 5:2) จำนวน 10 มิลลิลิตร นำหลอดทดลองใส่ใน block digester ย่อยสลายตัวอย่างจนได้สารละลายใส กรองสารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 ใส่ลงใน volumetric flask ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตร นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของแคดเมียมด้วยเครื่อง AAS (Amacher, 1996)

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตามวิธีของ Duncan's new Multiple Range Test

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สถานที่ทำการวิจัย

1. แปลงปลูกข้าวของเกษตรกรบริเวณพื้นที่ต้นน้ำ กลางน้ำและปลายน้ำของลุ่มน้ำแม่ตาว ได้แก่ ตำบลพระธาตุผาแดง และตำบลแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก จำนวน 12 แปลง

2. ห้องปฏิบัติการเคมีและความอุดมสมบูรณ์ของดิน ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

3. ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์วิจัยดินพืชและวัสดุเกษตร ฝ่ายปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ระยะเวลาในการวิจัย

เดือนมิถุนายน 2555 - สิงหาคม 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

โดยปกติพื้นผิวโลกจะมีโลหะหนักสะสมอยู่ปริมาณหนึ่ง ซึ่งเป็นผลมาจากการผุพังและสลายตัวของวัตถุต้นกำเนิดดินเอง ความเข้มข้นของโลหะหนักในเปลือกโลกและในดินมีค่าผันแปรได้ตามลักษณะวัตถุต้นกำเนิด ปริมาณอินทรียวัตถุ และระดับความลึกของดินเป็นสำคัญ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการสะสมแคดเมียมของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่ ลุ่มน้ำแม่ตาว จังหวัดตาก ประเทศไทย โดยการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียม และสมบัติบางประการของดินก่อนการเพาะปลูกและหลังการเก็บเกี่ยว พร้อมกับวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมในข้าว ได้แก่ ลำต้นส่วนเหนือดิน และเมล็ดข้าว (เมล็ดข้าวสารขัดสีและแกลบ) ของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียม ซึ่งพบว่า

1. สมบัติบางประการและโลหะหนักแคดเมียมที่สกัดได้ในดิน

ผลการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของดินแปลงนาที่ศึกษาก่อนการเพาะปลูกแสดงใน ตารางที่ 1 โดยพบว่า ค่าพีเอช ปริมาณอินทรียวัตถุ ปริมาณฟอสฟอรัสเป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้ ในแต่ละตำรับการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อนำมาประเมินตามรายงานของกองสำรวจดิน (2523) พบว่าปฏิกิริยาดินอยู่ในช่วงกรดจัดมากถึงด่างเล็กน้อย (5.41-7.46) มีปริมาณอินทรียวัตถุในดินอยู่ในระดับปานกลางถึงค่อนข้างต่ำ (1.40- 2.01 %) และพบว่ามีปริมาณฟอสฟอรัสเป็นประโยชน์อยู่ในระดับสูงถึงสูงมากคือ 26.72-72.59 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่โพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้พบว่าอยู่ในระดับต่ำถึงสูงมากคือ 27.88-128.09 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียมในดินก่อนปลูกพบความแปรปรวนของแคดเมียมในดินแต่ละพื้นที่ปลูกข้าว โดยพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ (HW) พื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ (MW) และพื้นที่ปลูกข้าวปลายน้ำ (EW) มีปริมาณแคดเมียมอยู่ในช่วง 15.35-36.20, 12.00-17.67 และ 11.45-46.87 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 1) ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติโดยพบว่าแปลง 12_{EW} มีปริมาณแคดเมียมสูงที่สุด (46.87 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และแปลง 8_{MW} และ 10_{EW} มีปริมาณแคดเมียมต่ำที่สุดคือ 12.00 และ 11.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งการสะสมแคดเมียมโดยทั่วไปมีสาเหตุจากกระบวนการผุพังสลายตัวตามธรรมชาติของแร่ และการที่ฝนตกชะหน้าดินที่อุดมด้วยแร่สังกะสีและแคดเมียม ลงสู่ต้นน้ำของลำน้ำธรรมชาติ ทำให้เกิดการสะสมในตะกอนท้องน้ำ และทำให้เกิดการแพร่กระจายของแคดเมียมได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 สมบัติบางประการและปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินก่อนปลูกข้าว

Area	pH (1:1)	OM (%)	Available P (mg/kg)	Exchangeable K (mg/kg)	Extractable Cd (mg/kg)
1_{HW}	6.65 b-c[1/]	1.84 a-b	60.64 a-b	84.75 f	20.10 d
2_{HW}	6.31 c-d	1.69 a-c	38.76 c-e	123.07 b	15.35 d-e
3_{HW}	6.10 d-e	1.87 a-b	34.07 c-e	80.89 g	27.47 c
4_{HW}	7.36 a	1.84 a-b	62.85 a-b	106.11 d	36.20 b
5_{MW}	5.41 f	1.40 c	48.41 b-d	86.44 e	15.05 d-e
6_{MW}	5.67 e-f	1.68 a-c	26.89 e	128.09 a	17.67 d-e
7_{MW}	5.83 d-f	1.45 c	72.59 a	79.64 h	13.00 d-e
8_{MW}	5.86 d-f	1.80 a-b	31.67 d-e	113.11 c	12.00 e
9_{EW}	7.09 a-b	1.79 a-b	48.78 b-d	55.02 i	14.10 d-e
10_{EW}	7.25 a	2.01 a	26.72 e	27.88 j	11.45 e
11_{EW}	7.27 a	1.59 b-c	66.57 a-b	28.72 j	16.02 d-e
12_{EW}	7.46 a	1.70 a-c	51.60 b-c	86.33 e	46.87 a
F-test	**	**	**	**	**
CV %	11.43	10.24	33.52	39.44	53.72

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินของพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำแสดงในตารางที่ 2 3 และ 4 พบว่าค่าพีเอชในแต่ละแปลงของพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยพบว่าแปลง 4_{HW} มีค่าพีเอชสูงสุดคือ pH 7.36 ส่วนพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ และปลายน้ำไม่มีความแตกต่างกัน ปริมาณอินทรียวัตถุพบว่า ในพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำมีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยแปลงที่ 6_{MW} และ 8_{MW} มีปริมาณอินทรียวัตถุสูงสุด (1.68 และ1.80 % ตามลำดับ) สำหรับปริมาณฟอสฟอรัสเป็นประโยชน์ โพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้และปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของแปลง 1_{HW} 6_{MW} และ 12_{EW} มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงสุดคือ 60.64 72.59 66.57 และ 51.60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้พบว่าในแปลง 2_{HW} 6_{MW} และ 12_{EW} มีปริมาณโพแทสเซียมแลกเปลี่ยนสูงสุด 123.07 128.09 และ 86.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้พบว่าในพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ มีปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้สูงสุดในแปลง 4_{HW} (36.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งสูงกว่าแปลงอื่นๆ ในพื้นที่เดียวกันสันนิษฐานได้ว่าในแปลง 4_{HW} อยู่ใกล้กับลุ่มน้ำแม่ตาวมากที่สุด รองลงมาเป็นแปลง 3_{HW} (27.47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ส่วนแปลง 2_{HW} อยู่ห่างจากแหล่งน้ำมากที่สุดจึงพบปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ต่ำกว่าแปลงอื่นๆ (15.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับพื้นที่ศึกษาในพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ และพื้นที่ปลูกข้าวปลายน้ำที่พบว่าในแปลงปลูกข้าวที่อยู่ใกล้แหล่งน้ำพบปริมาณแคดเมียมสูงกว่าแปลงอื่นๆในพื้นที่ และมีรายงานวิจัยของอนงค์นาฏ (2549) ที่ศึกษาการปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่ลุ่มและที่ดอนน้ำขัง บ้านพะเด๊ะ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งพบปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในพื้นที่ลุ่ม 27.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในพื้นที่ดอนน้ำขังพบปริมาณแคดเมียมเฉลี่ย 23.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยเฉพาะที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร และจากการศึกษานี้พบว่าในจุดที่อยู่ติดกับลุ่มน้ำแม่ตาวมีปริมาณแคดเมียมสูงกว่าจุดอื่นๆ ในพื้นที่ศึกษา ประยุทธ (2542) ศึกษาการแพร่กระจายของแคดเมียมและสังกะสีในดิน ในพื้นที่ อำเภอแม่สอด จังหวัดตากพบว่าปริมาณการปนเปื้อนของโลหะหนักแคดเมียมทั้งหมดในดินของพื้นที่ ลุ่ม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 50.84 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณค่าโลหะหนักมาตรฐานในดิน ที่ยอมให้มีได้สูงสุดในดินเพื่อการเกษตรของสหภาพยุโรป (< 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

สมบัติบางประการของดินและปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่ศึกษา (ตารางที่ 5) พบว่าทั้งพีเอช ปริมาณอินทรียวัตถุ โพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้ และปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในแต่ละพื้นที่มีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพื้นที่ปลูกข้าวปลายน้ำ (EW) มีค่าพีเอชเฉลี่ยสูงสุดคือ 7.27 รองลงมาคือพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ (HW) และพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ (MW) มีค่า pH

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ที่ 6.60 และ 5.70 ตามลำดับ ปริมาณอินทรียวัตถุของกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ (HW) และปลายน้ำ (EW) ไม่แตกต่างกัน (1.81 และ 1.77 % ตามลำดับ) ซึ่งสูงกว่ากลุ่มพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ คือ 1.58 % ส่วนโพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้ของกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ และกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ สูงกว่ากลุ่มพื้นที่ปลูกข้าวปลายน้ำ คือ 98.71 101.82 และ 49.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ของพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ (HW) มีปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 24.78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าในพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ (MW) และพื้นที่ปลูกข้าวปลายน้ำ (EW) (14.43 และ 22.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) และได้แสดงระดับการปนเปื้อนแคดเมียมในดินก่อนปลูกดังภาพที่ 3 ซึ่งการแพร่กระจายของแคดเมียมในดินมักสะสมอยู่ในดินชั้นไถพรวน ซึ่งมีความลึกประมาณ 20 เซนติเมตร จากผิวดิน และการกระจายของโลหะหนักในหน้าตัดดินแตกต่างกันไปตามสมบัติของดิน เช่นปริมาณอินทรียวัตถุ และการซาบซึมน้ำของดิน และธรรมชาติของโลหะนั้นๆ (ทัศนีย์, 2550)

ตารางที่ 2 สมบัติบางประการและปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินของพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ

Area	pH (1:1)	OM (%)	Available P (mg/kg)	Exchangeable K (mg/kg)	Extractable Cd (mg/kg)
1_{HW}	6.65 b[1/]	1.84	60.64 a	84.75 c	20.10 c
2_{HW}	6.31b	1.69	38.76 b	123.07 a	15.35 c
3_{HW}	6.10 b	1.87	34.07 b	80.89 d	27.47 b
4_{HW}	7.36 a	1.84	62.85 a	106.11 b	36.20 a
F-test	**	ns	**	**	**
CV %	5.95	14.16	23.66	1.05	16.19

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 สมบัติบางประการและปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินของพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ

Area	pH (1:1)	OM (%)	Available P (mg/kg)	Exchangeable K (mg/kg)	Extractable Cd (mg/kg)
5_{MW}	5.41	1.40 b[1/]	48.41 b	86.44 c	15.05 b
6_{MW}	5.67	1.68 a	26.89 c	128.09 a	17.67 a
7_{MW}	5.83	1.45 b	72.59 a	79.64 d	13.00 bc
8_{MW}	5.86	1.80 a	31.67 c	113.11 b	12.00 c
F-test	ns	**	**	**	**
CV %	4.13	9.02	20.33	0.79	9.69

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ 4 สมบัติบางประการและปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินของพื้นที่ปลูกข้าวปลายน้ำ

Area	pH (1:1)	OM (%)	Available P (mg/kg)	Exchangeable K (mg/kg)	Extractable Cd (mg/kg)
9_{EW}	7.09	1.79	48.78 ab[1/]	55.02 b	14.10 b
10_{EW}	7.25	2.01	26.72 b	27.88 d	11.45 b
11_{EW}	7.27	1.59	66.57 a	28.72 c	16.02 b
12_{EW}	7.46	1.70	51.60 a	86.33 a	46.87 a
F-test	ns	ns	**	**	**
CV %	3.46	10.96	29.45	0.67	29.85

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบสมบัติบางประการและปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินของก่อนปลูกแต่ละกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าว

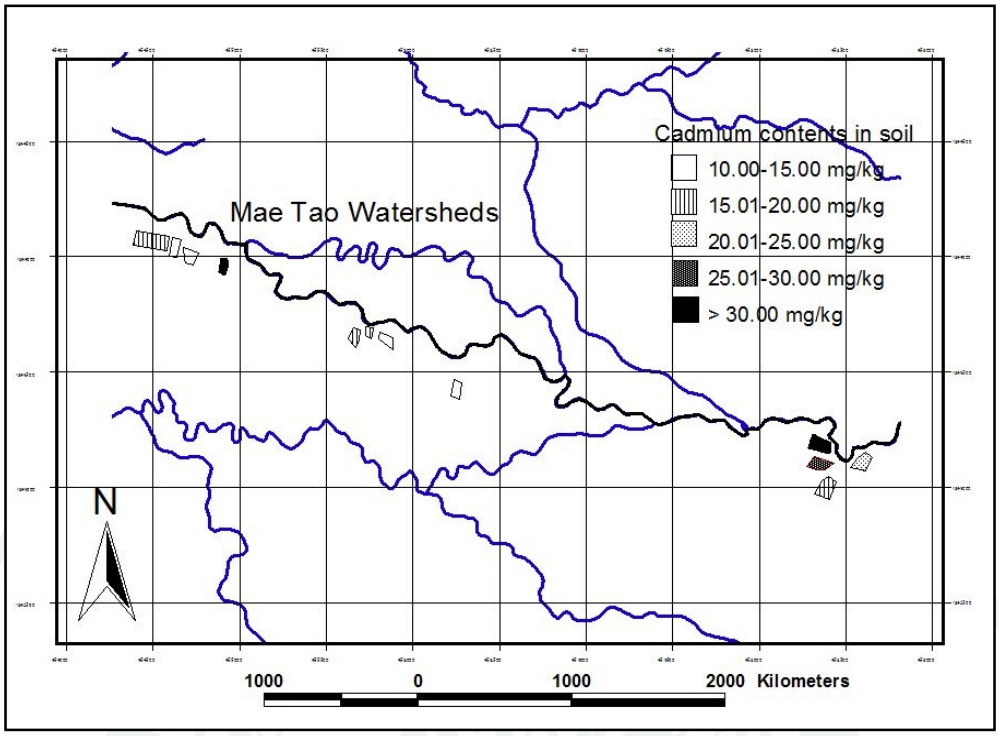
Area	pH (1:1)	OM (%)	Available P (mg/kg)	Exchangeable K (mg/kg)	Extractable Cd (mg/kg)
Head watershed area	6.60 b[1/]	1.81 a	49.08	98.71 a	24.78 a
Middle watershed area	5.70 c	1.58 b	44.90	101.82 a	14.43 b
End watershed area	7.27 a	1.77 a	48.17	49.50 b	22.11 a
F-test	**	*	ns	**	*
CV %	12.08	7.14	4.64	35.22	20.44

หมายเหตุ *,** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 % ตามลำดับ

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 3 ระดับการปนเปื้อนแคดเมียมในดินก่อนปลูกข้าว

จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้กับปฏิกิริยาดินก่อนการเพาะปลูก พบว่าปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับพีเอชและปริมาณอินทรียวัตถุ มีค่า r เท่ากับ 0.46 และ 0.15 ตามลำดับ โดยปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้มีค่ากระจายตัวอยู่ระหว่าง 11.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ถึง 46.87 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และค่าพีเอชมีค่ากระจายตัวอยู่ระหว่าง 5.41 ถึง 7.46 และปริมาณอินทรียวัตถุมีค่ากระจายตัวอยู่ระหว่าง 1.40 เปอร์เซ็นต์ ถึง 2.01 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าพีเอชของดินเป็นดัชนีที่สำคัญสามารถบ่งบอกถึงสมบัติทางเคมีและความอุดมสมบูรณ์ของดินได้ ทั้งนี้เนื่องจากค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อกระบวนการทางเคมีและชีวเคมีในดิน เช่นกิจกรรมของจุลินทรีย์ ความสามารถในการละลาย/ตกตะกอน ตลอดจนการเคลื่อนย้ายสูญหายของสารประกอบและไอออนต่างๆ จึงทำให้มีอิทธิพลต่อความเป็นประโยชน์และความเป็นพิษของธาตุอาหารต่างๆของพืชดังนั้นค่าพีเอชของดินที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้การดูดดึงแคดเมียมของพืชลดลงได้ (เพื่อนจิต, 2548) และปริมาณอินทรียวัตถุที่สูงในดินนั้นจะช่วยลดแคดเมียมในดินได้ เนื่องจากอินทรียวัตถุสามารถจับยึดแคดเมียมได้ดี จึงทำให้แคดเมียมจับยึดกับอินทรีย์ในดินมากขึ้นและพืชก็จะดูดดึงแคดเมียมไปใช้ได้น้อยลง และพืชที่ปลูกบนดินทรายจะมีการสะสมแคดเมียมได้มากกว่าพืชที่ปลูกบนดินเหนียว (Chaney, 1982)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. การเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว

จากการวิเคราะห์ความแตกต่างของความสูงของต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่อายุ 45 90 และ 120 วัน หลังปักดำดังตารางที่ 6 พบว่าความสูงของต้นข้าวขาวดอกมะลิมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยพบว่าข้าวที่อายุ 45 วัน ในแปลง 4_{HW} 9_{EW} และ 10_{EW} ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีความสูงมากที่สุดคือ 26.00 26.17 และ 25.60 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อข้าวอายุ 90 วัน ในแปลง 9_{EW} และ 10_{EW} ยังคงมีความสูงสูงที่สุดคือ 77.97 และ 78.05 เซนติเมตร และที่อายุ 120 วัน พบว่าแปลง 9_{EW} พบการเจริญเติบโตทางด้านความสูงของข้าวดีที่สุดคือ 99.98 เซนติเมตร ซึ่งส่วนใหญ่สูงกว่าข้าวในแปลงของพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ (HW) และพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ (MW)

เมื่อพิจารณาความสูงของต้นข้าวในแต่ละพื้นที่ศึกษาดังตารางที่ 7 8 และ 9 พบว่าที่อายุ 45 วัน การเจริญเติบโตทางด้านความสูงของต้นข้าวในพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ (HW) และกลางน้ำ (MW) มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยความสูงของต้นข้าวในแปลง 4_{HW} มีความสูงเฉลี่ยสูงที่สุดคือ 26.00 เซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าแปลง 1_{HW} 2_{HW} และ 3_{HW} (21.59 22.63 และ 21.56 เซนติเมตร ตามลำดับ) สำหรับพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ (MW) พบว่าต้นข้าวในแปลง 5_{MW} และ 6_{MW} มีความสูงกว่าแปลงอื่นๆในกลุ่มเดียวกันซึ่งไม่แตกต่างกับแปลง 7_{MW} คือ 23.75 23.65 และ 22.55 เซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับความสูงที่อายุ 90 และ 120 วันของทุกพื้นที่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ปัจจัยที่มีผลต่อความสูงหรือการเจริญเติบโตทางลำต้นของต้นข้าว เช่น ดิน ปริมาณน้ำ แสง และอุณหภูมิ เป็นต้น นอกจากนี้การปนเปื้อนของแคดเมียมในปริมาณที่มากเกินไป เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความสูงหรือการเจริญเติบโตทางลำต้นของต้นข้าว ซึ่งจากการเปรียบเทียบความสูงเฉลี่ยของต้นข้าวในแต่ละพื้นที่ (ตารางที่ 10) พบว่าพื้นที่ปลูกข้าวปลายน้ำ (EW) มีการเจริญเติบโตทางด้านความสูงเฉลี่ยสูงที่สุดทั้ง 3 ช่วงอายุ 45 90 และ 120 วัน โดยมีความสูงของต้นข้าวเฉลี่ยเท่ากับ 25.19 76.70 และ 97.61 เซนติเมตร ตามลำดับ

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณแคดเมียมในดินไม่มีผลต่อความสูงของต้นข้าว แต่ถ้าปริมาณแคดเมียมในดินสูงเกินไปก็อาจจะมีผลต่อผลผลิตข้าวได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ พิชิต (2545) ที่พบว่าข้าวที่ปลูกในบริเวณที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมไม่แสดงอาการผิดปกติทางลำต้นและใบให้เห็นด้วยตาเปล่า และจากงานวิจัยของ สรัตนา (2548) ที่ทำการศึกษาการดูดดึงแคดเมียมของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียมในเรือนทดลอง ซึ่งพบว่าข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนต่ำ (น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน) มีการเจริญเติบโตด้านความสูงดีที่สุด แต่แคดเมียมในลำต้นและใบข้าวในดินที่มีการปนเปื้อน (มากกว่า 21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และดิน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปนเปื้อนสูงมาก (มากกว่า 35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) มีค่าความเข้มข้นเข้าใกล้ค่าวิกฤติที่เริ่มแสดงอาการเป็นพิษในข้าว ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 5-10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ศุภมาศ, 2540) ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในดินที่มีการปนเปื้อนอาจมีผลทำให้ข้าว แสดงอาการผิดปกติ ดังกล่าว ซึ่ง Balestrasse *et al.* (2003) และ Siriporndulsil *et al.* (2002) รายงานว่าแคดเมียมมีผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ และกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชลดลงเมื่อมีปริมาณแคดเมียมสูงในพืช โดยแคดเมียมมีผลต่อไรบูโลสบิสฟอสเฟต (RuBP) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีคาร์บอน 5 อะตอม และเอนไซม์ไรบูโลสบิสฟอสเฟต-คาร์บอกซิเลส (RuBP-carboxylase) ที่เกิดขึ้นในส่วนของวัฏจักรของกระบวนการสังเคราะห์แสง (calvin cycle) เสียสมดุล จึงมีผลทำให้กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชลดลง (Pankovic *et al.,*2000) สาเหตุของข้าวที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักสูง (มากกว่า 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ในเรือนทดลอง แสดงอาการผิดปกติเห็นได้ชัดเจน และรุนแรงกว่าข้าวที่ปลูกในสภาพไร่นาอาจเนื่องมาจากข้าวที่ปลูกในเรือนทดลองเป็นระบบปิดไม่มีปัจจัยภายนอก เช่น สภาพภูมิอากาศ และปริมาณน้ำที่พืชได้รับ มาทำให้ดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักเกิดการผันแปรเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ปลูกในสภาพไร่นาในดินดังกล่าว จึงทำให้ข้าวในเรือนทดลองได้รับผลกระทบโดยตรงจากปริมาณธาตุโลหะหนักในดิน อย่างไรก็ตามปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในลำต้นและใบข้าว สามารถบ่งชี้ถึงความเสี่ยงต่อความเป็นพิษของแคดเมียมต่อข้าวที่จะอาจมีผลทำให้ผลผลิตลดลงถึง 40 เปอร์เซ็นต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 6 ความสูงและผลผลิตของข้าวในพื้นที่ศึกษา

Area	Plant height (cm)			Rice yield
	45 days	90 days	120 days	(kg/rai)
1_{HW}	21.59 c-d[1/]	66.00 c-d	91.87 a-c	589.15 b-c
2_{HW}	22.63 b-c	63.25 d	88.87 c	614.56 b
3_{HW}	21.56 c-d	64.37 d	96.45 a-c	519.19 d
4_{HW}	26.00 a	69.22 b-d	90.35 b-c	464.18 e
5_{MW}	23.75 a-c	75.27 a-b	94.92 a-c	592.72 b-c
6_{MW}	23.65 a-c	70.37 a-d	89.10 c	528.43 d
7_{MW}	22.55 c	73.32 a-c	93.12 a-c	623.30 b
8_{MW}	22.55 c	73.32 a-c	93.12 a-c	665.52 a
9_{EW}	26.17 a	77.97 a	101.37 a	626.18 b
10_{EW}	25.60 a	78.05 a	99.98 a-b	666.81 a
11_{EW}	25.20 a-b	74.77 a-b	93.98 a-c	573.81 c
12_{EW}	23.77 a-c	76.00 a-b	95.12 a-c	457.29 e
F-test	**	**	**	**
CV %	6.95	7.16	4.15	12.26

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 7 ความสูงของต้นข้าวในพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ (เซนติเมตร)

Area	Days		
	45	90	120
1_{HW}	21.59 b[1/]	65.00	89.50
2_{HW}	22.63 b	63.25	88.87
3_{HW}	21.56 b	64.37	96.45
4_{HW}	26.00 a	69.22	90.35
F-test	*	ns	ns
CV %	8.26	3.99	3.82

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ 8 ความสูงของต้นข้าวในพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ (เซนติเมตร)

Area	Days		
	45	90	120
5_{MW}	23.75 a[1/]	75.27	94.92
6_{MW}	23.65 a	70.37	89.10
7_{MW}	22.55 ab	73.32	93.12
8_{MW}	19.82 b	68.67	90.70
F-test	*	ns	ns
CV %	8.16	4.11	2.8

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 9 ความสูงของต้นข้าวในพื้นที่ปลูกข้าวปลายน้ำ (เซนติเมตร)

Area	Days		
	45	90	120
9_{EW}	26.17	77.97	101.37
10_{EW}	25.60	78.05	99.98
11_{EW}	25.20	74.77	93.98
12_{EW}	23.77	76.00	95.12
F-test	ns	ns	ns
CV %	4.07	2.08	3.7

หมายเหตุ ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ 10 ความสูงเฉลี่ยของต้นข้าวในแต่ละกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าว (เซนติเมตร)

Area	Days		
	45	90	120
Head watershed area	22.95 b[1/]	65.71 c	91.89 b
Middle watershed area	22.44 b	71.91 b	91.96 b
End watershed area	25.19 a	76.70 a	97.61 a
F-test	*	*	*
CV %	6.21	7.71	3.50

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สำหรับผลผลิตข้าวดังตารางที่ 6 พบว่าแปลง 8_{MW} และแปลง 10_{EW} ให้ผลผลิตสูงสุดและใกล้เคียงกันคือ 665.52 และ 666.81 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ และแปลง 4_{HW} และ 12_{EW} ให้ผลผลิตต่ำสุดคือ 464.18 และ 457.29 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ และพิจารณาผลผลิตของข้าวในแต่ละพื้นที่ปลูกข้าว (ตารางที่ 11) พบว่าผลผลิตข้าวเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่ปลูกข้าวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง โดยพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ (HW) พบว่าผลผลิตในแปลง 1_{HW} และแปลง 2_{HW} ให้ผลผลิตสูงสุดคือ 589.15 และ 614.57 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ ส่วนพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ (MW) พบว่าผลผลิตในแปลง 8_{MW} ให้ผลผลิตสูงสุดคือ 665.53 กิโลกรัมต่อไร่ และในพื้นที่ปลูกข้าวปลายน้ำ (EW) พบว่าผลผลิตข้าวในแปลง 10_{EW} ให้ผลผลิตสูงสุด 666.81 กิโลกรัมต่อไร่ และเมื่อพิจารณาผลผลิตเฉลี่ยของแต่ละพื้นที่ปลูกข้าวแสดงในตารางที่ 12 พบว่าพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำและปลายน้ำ ให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงสุดคือ 602.49 และ 581.02 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกัน ส่วนกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ ให้ผลผลิตเฉลี่ยต่ำที่สุด 546.77 กิโลกรัมต่อไร่

ตารางที่ 11 ผลผลิตของข้าวในพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ

Area	Rice yield (kg/rai)	Area	Rice yield (kg/rai)	Area	Rice yield (kg/rai)
1_{HW}	589.15 a[1/]	5_{MW}	592.72 c[1/]	9_{EW}	626.18 b[1/]
2_{HW}	614.57 a	6_{MW}	528.43 d	10_{EW}	666.81 a
3_{HW}	519.19 b	7_{MW}	623.30 b	11_{EW}	573.81 c
4_{HW}	464.18 c	8_{MW}	665.53 a	12_{EW}	457.29 d
F-test	**	*F-test*	**	*F-test*	**
CV %	12.48	CV %	9.58	CV %	15.64

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 12 ผลผลิตของข้าวเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าว

Area	Rice yield (kg/rai)
Head watershed area	546.77 c[1/]
Middle watershed area	602.49 a
End watershed area	581.02 ab
F-test	*
CV %	4.87

หมายเหตุ * มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

3. การสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่อายุต่างๆ และผลผลิตข้าว

จากการวิเคราะห์การสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่อายุ 45 90 และ 120 วัน (ตารางที่ 13) พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าแคดเมียมในต้นข้าวที่อายุ 45 วัน ในแปลง 8_{MW} พบปริมาณแคดเมียมสูงที่สุดคือ 12.71 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในแปลง 6_{MW} และ 11_{EW} มีปริมาณแคดเมียมต่ำสุดคือ 9.82 และ 9.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อข้าวอายุ 90 วัน พบว่าในแปลง 2_{HW} มีปริมาณแคดเมียมสูงสุดคือ 16.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในแปลง 11_{EW} และ 12_{EW} มีปริมาณแคดเมียมต่ำสุดคือ 10.30 และ 10.24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และข้าวอายุ 120 วันหลัง ปริมาณแคดเมียมในแปลง 1_{HW} และ 5_{MW} มีปริมาณแคดเมียมสูงสุดคือ 17.34 และ 16.69 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในแปลง 9_{EW} 10_{EW} และ 11_{EW} พบปริมาณแคดเมียมในลำต้นข้าวส่วนเหนือดินต่ำสุดคือ 11.28 10.93 และ 11.05 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และพบว่าปริมาณแคดเมียมจะสูงขึ้นเมื่ออายุข้าวเพิ่มขึ้นในทุกพื้นที่ปลูกข้าว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 13 การสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่อายุต่างๆ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

Area	Days		
	45	90	120
1_{HW}	10.89 b[1/]	13.23 b	17.34 a
2_{HW}	10.29 b-d	16.06 a	15.04 b
3_{HW}	9.99 c-d	11.03 c-f	11.75 c-d
4_{HW}	10.97 b	11.56 c-e	12.95 c
5_{MW}	10.02 c	10.52 d-f	16.69 a
6_{MW}	9.82 d	10.34 e-f	12.21 c-d
7_{MW}	10.10 b-d	11.17 c-f	11.69 c-d
8_{MW}	12.71 a	11.96 c	11.40 c-d
9_{EW}	9.91 c-d	10.99 c-f	11.28 d
10_{EW}	10.77 b-c	11.70 c-d	10.93 d
11_{EW}	9.85 d	10.30 f	11.05 d
12_{EW}	9.88 c-d	10.24 f	11.96 c-d
F-test	**	**	**
CV %	7.96	14.21	17.38

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

จากตารางที่ 14 15 และ 16 แสดงปริมาณการสะสมแคดเมียมในต้นข้าวของแต่ละพื้นที่ปลูกข้าวเมื่อนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง โดยพบว่าพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ (HW) ที่อายุข้าว 45 วัน แปลง 1_{HW} และ 4_{HW} มีปริมาณแคดเมียมสูงสุดคือ 10.89 และ 10.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่อายุต้นข้าว 90 วัน แปลง 2_{HW} มีปริมาณแคดเมียมสูงสุด 16.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่ออายุข้าว 120 วัน ในแปลง 1_{HW} มีปริมาณแคดเมียมสูงสุดคือ 17.34 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ (MW) ที่อายุข้าว 45 และ 90 วัน ในแปลง 8_{MW} มีปริมาณแคดเมียมสูงสุดคือ 12.71 และ 11.96 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อข้าวอายุ 120 วัน พบว่าในแปลง 5_{MW} มีปริมาณแคดเมียมสูงสุดคือ 16.69 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และพื้นที่ปลูก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้าวปลายน้ำ (EW) เมื่ออายุข้าว 45 และ 90 วัน ในแปลง 10_{EW} มีปริมาณแคดเมียมสูงสุดคือ 10.77 และ 11.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่ออายุข้าว 120 วัน ในแปลง 12_{EW} มีปริมาณแคดเมียมสูงสุดคือ 11.96 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หากเมื่อพิจารณาปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมเฉลี่ยในต้นข้าวที่อายุต่างๆ ของแต่ละพื้นที่ (ตารางที่ 17) พบว่าที่อายุข้าว 45 วัน ปริมาณแคดเมียมไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่เมื่ออายุได้ 90 และ 120 วัน พบความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง โดยพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำมีปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยสูงสุดคือ 12.97 และ 14.27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณแคดเมียมเพิ่มขึ้นตามอายุข้าวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากข้าวมีการเจริญเติบโตซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการสะสมแคดเมียมที่ข้าวดูดดึงจากดิน รายงานการวิจัยความเข้มข้นของแคดเมียมมีอิทธิพลต่อข้าว โดยทดลองปลูกข้าวในสารละลาย พบว่าข้าวที่ปลูกในสารละลายที่มีแคดเมียมมากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ปริมาณแคดเมียมในข้าวมีค่าสูงถึง 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีผลทำให้ผลผลิตข้าวลดลง (Chen, 1992)

ตารางที่ 14 การสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่อายุต่างๆ บนพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

Area	Days		
	45	90	120
1_{HW}	10.89 a[1/]	13.23 b	17.34 a
2_{HW}	10.29 b	16.06 a	15.04 b
3_{HW}	9.99 b	11.03 c	11.75 c
4_{HW}	10.97 a	11.56 b-c	12.95 b-c
F-test	**	**	**
CV %	4.49	17.45	17.22

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 15 การสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่อายุต่างๆ บนพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

Area	Days		
	45	90	120
5_{MW}	10.02 b[1/]	10.52 c	16.69 a
6_{MW}	9.82 b	10.34 c	12.22 b
7_{MW}	10.14 b	11.18 b	11.69 b
8_{MW}	12.71 a	11.96 a	11.40 b
F-test	**	**	**
CV %	12.79	6.68	19.1

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ตารางที่ 16 การสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่อายุต่างๆ บนพื้นที่ปลูกข้าวปลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

Area	Days		
	45	90	120
9_{EW}	9.92 b[1/]	10.99 b	11.28 b
10_{EW}	10.77 a	11.70 a	10.93 c
11_{EW}	9.85 b	10.30 c	11.05 b-c
12_{EW}	9.88 b	10.25 c	11.96 a
F-test	**	**	**
CV %	4.4	6.32	4.07

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 17 การสะสมแคดเมียมเฉลี่ยในต้นข้าวที่อายุต่างๆ ของแต่ละกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าว (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

Area	Days		
	45	90	120
Head watershed area	10.54	12.97 a[1/]	14.27 a
Middle watershed area	10.67	11.00 b	13.00 a
End watershed area	10.11	10.87 b	11.31 b
F-test	ns	**	**
CV %	12.08	7.14	4.64

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

สำหรับน้ำหนักแห้งต่อกอ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 18) โดยน้ำหนักแห้งที่อายุ 45 วัน ของพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ (HW) กลางน้ำ (MW) และปลายน้ำ (EW) ให้น้ำหนักแห้งของต้นข้าวต่อกออยู่ในช่วง 0.014-0.020 กิโลกรัม เมื่อข้าวมีอายุ 90 วัน น้ำหนักแห้งของข้าวต่อกออยู่ในช่วง 0.019-0.023 กิโลกรัม และที่ข้าวอายุ 120 วัน น้ำหนักแห้งต่อกออยู่ในช่วง 0.018-0.025 กิโลกรัม ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 18 น้ำหนักแห้งของต้นข้าวที่อายุต่างๆ (กิโลกรัมต่อกอ)

Area	Day		
	45	90	120
1_{HW}	0.019 a[1/]	0.020 a-b	0.023 a-c
2_{HW}	0.014 b	0.019 b	0.024 a-b
3_{HW}	0.020 a	0.020 a-b	0.025 a
4_{HW}	0.019 a	0.022 a	0.020 c-e
5_{MW}	0.018 a	0.023 a	0.020 c-e
6_{MW}	0.019 a	0.023 a	0.022 a-d
7_{MW}	0.020 a	0.022 a	0.019 d-e
8_{MW}	0.019 a	0.020 a-b	0.018 e
9_{EW}	0.015 b	0.020 a-b	0.021 b-e
10_{EW}	0.019 a	0.022 a	0.022 a-d
11_{EW}	0.018 a	0.023 a	0.022 a-d
12_{EW}	0.018 a	0.021 a-b	0.020 c-e
F-test	**	**	*
CV %	10.13	6.29	9.79

หมายเหตุ *,** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 % ตามลำดับ

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สำหรับปริมาณแคดเมียมในผลผลิตข้าว คือ ข้าวสารและแกลบแสดงในตารางที่ 19 พบว่าปริมาณแคดเมียมของข้าวสารในแปลง 1_{HW} และ 5_{MW} มีปริมาณแคดเมียมสูงสุดคือ 9.27 และ 9.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในแปลง 9_{EW} 10_{EW} และ 11_{EW} มีปริมาณแคดเมียมต่ำที่สุด (7.60 7.49 และ 7.65 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) สำหรับปริมาณแคดเมียมในแกลบพบว่าในแปลง 1_{HW} และ 4_{HW} มีปริมาณแคดเมียมสูงสุดคือ 10.42 และ 10.32 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในแปลง 6_{MW} และแปลง 10_{EW} 11_{EW} และ 12_{EW} มีปริมาณแคดเมียมต่ำสุดคือ 7.67 7.66 7.62 และ 7.52 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน EU ซึ่งกำหนดไว้ไม่ควรเกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในผลผลิตข้าวในแต่ละพื้นที่ปลูกข้าว (ตารางที่ 20) พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติโดยปริมาณแคดเมียมในข้าวสารของแปลง 1_{HW} 5_{MW} และ 12_{EW} มีค่าสูงสุดคือ 9.27 9.08 และ 7.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนในแกลบพบว่าในแปลง 1_{HW} 7_{MW} และ 9_{EW} มีปริมาณแคดเมียมสูงสุด 10.42 9.51 และ 8.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

สำหรับการสะสมแคดเมียมในผลผลิตข้าวของแต่ละพื้นที่ปลูกข้าว (ตารางที่ 21) เมื่อนำผลมาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง โดยในพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ (HW) และพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ (MW) ในข้าวสารมีปริมาณแคดเมียมสูงสุด 8.31 และ 8.62 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนในแกลบพบว่าปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมสูงสุดในพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ มีความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 9.86 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 19 การสะสมแคดเมียมในผลผลิตข้าว (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

Area	Milled rice	Rice husk
1_{HW}	9.27 a[1/]	10.42 a
2_{HW}	8.48 b-c	10.05 b
3_{HW}	7.15 f	8.67 e
4_{HW}	8.33 c	10.32 a
5_{MW}	9.07 a	8.36 f
6_{MW}	8.26 c	7.67 h
7_{MW}	8.67 b	9.51 c
8_{MW}	8.50 b-c	9.00 d
9_{EW}	7.60 e	8.08 g
10_{EW}	7.49 e	7.66 h
11_{EW}	7.65 e	7.62 h
12_{EW}	7.97 d	7.52 h
F-test	**	**
CV %	7.91	12.59

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 20 การสะสมแคดเมียมในผลผลิตข้าวของกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

Area	Head watershed area		Area	Middle watershed area		Area	End watershed area	
	Milled rice	Rice husk		Milled rice	Rice husk		Milled rice	Rice husk
1_{HW}	9.27 a[1/]	10.42 a	5_{MW}	9.08 a	8.36 c	9_{EW}	7.60 b	8.08 a
2_{HW}	8.49 b	10.05 b	6_{MW}	8.26 c	7.67 d	10_{EW}	7.49 b	7.66 b
3_{HW}	7.15 c	8.68 c	7_{MW}	8.67 b	9.51 a	11_{EW}	7.65 b	7.62 b
4_{HW}	8.34 b	10.32 bc	8_{MW}	8.50 b	9.00 b	12_{EW}	7.97 a	7.52 b
F-test	**	**	*F-test*	**	**	*F-test*	*	**
CV %	4.49	17.45	CV %	12.79	6.68	CV %	4.40	6.32

หมายเหตุ *,** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 % ตามลำดับ

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ตารางที่ 21 การสะสมแคดเมียมในผลผลิตข้าวของแต่ละกลุ่มพื้นที่ปลูกข้าว (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

Area	Milled rice	Rice husk
Head watershed area	8.31 a[1/]	9.86 a
Middle watershed area	8.62 a	8.63 b
End watershed area	7.68 b	7.72 c
F-test	**	**
CV %	5.84	12.29

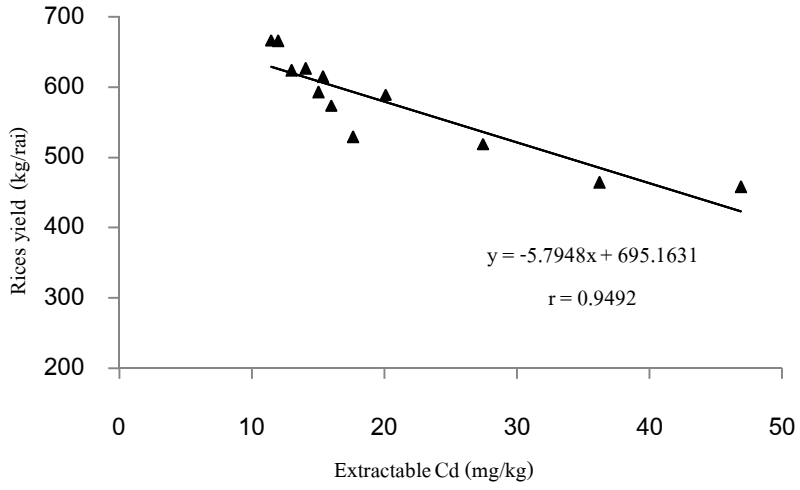
หมายเหตุ ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. ความสัมพันธ์ของปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินก่อนปลูกกับการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมในดินก่อนปลูกกับผลผลิตข้าวดังภาพที่ 4 พบว่าปริมาณแคดเมียมมีความสัมพันธ์เชิงลบกับผลผลิตข้าวโดยมี r เท่ากับ 0.9492ซึ่งหมายความว่าการปนเปื้อนแคดเมียมในดินสูงขึ้นมีผลทำให้ผลผลิตข้าวลดลง จากตารางที่ 1 และ 6 แสดงให้เห็นว่าข้าวที่ปลูกในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมสูงในแปลง 4_{HW} และ 12_{EW} ที่มีปริมาณแคดเมียมในดินก่อนปลูกเท่ากับ 36.20 และ 46.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ มีผลทำให้ผลผลิตข้าวลดลงเหลือ 464.18 และ 457.29 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ปลูกในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมต่ำสุด ที่มีปริมาณแคดเมียมในดินเท่ากับ 11.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ให้ผลผลิตข้าวเท่ากับ 666.81 กิโลกรัมต่อไร่ มีรายงานการศึกษาความเข้มข้นแคดเมียมในเมล็ดข้าวที่ปลูกในดินที่ใส่แคดเมียมในระดับต่างๆ พบว่าข้าวที่ปลูกในดินที่ใส่แคดเมียมมากกว่า 21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่ให้ผลผลิต สรัตนา (2548) ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่าข้าวที่ปลูกในดินที่มีปริมาณแคดเมียมมากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ข้าวยังคงให้ผลผลิตอยู่แต่มีแนวโน้มลดลง เพราะแคดเมียมมีผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์และกระบวนการสังเคราะห์แสงลดลง มีผลทำให้ผลผลิตพืชลดลงด้วย



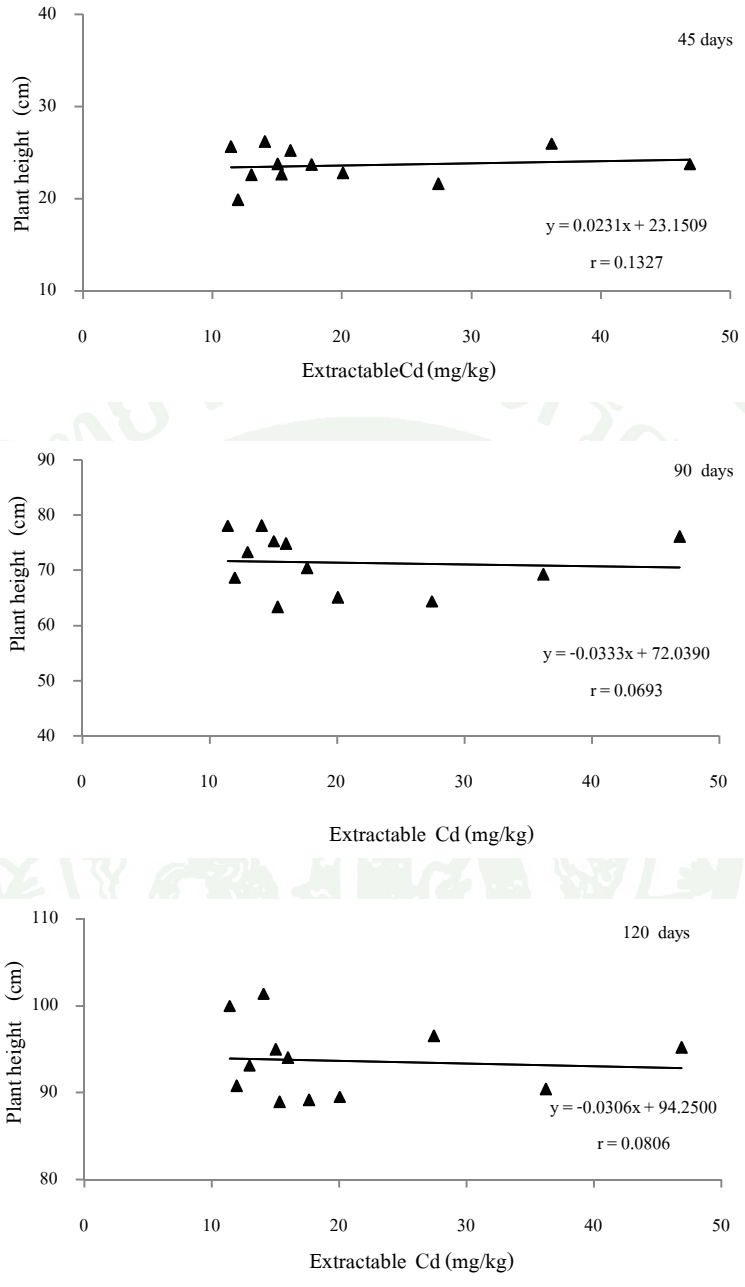
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้กับผลผลิตข้าว

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินก่อนปลูกกับความสูงและการสะสมแคดเมียมในต้นข้าวที่อายุ 45 90 และ 120 วัน ตามลำดับ ไม่พบความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 5 และ 6 จากรายงานการวิจัยของ Taylor and Percival, (2001) พบว่าแคดเมียมเคลื่อนย้ายในต้นข้าวและใบข้าวโดยผ่านทางท่อลำเลียงน้ำ จากนั้นแคดเมียมจะเคลื่อนผ่านทางท่อลำเลียงอาหาร ส่วนเมล็ดข้าวซึ่งเป็นที่สะสมคาร์โบไฮเดรตจะได้สารอาหารรวมถึงแคดเมียมจากท่อลำเลียงอาหาร ซึ่งอัตราการเคลื่อนย้ายแคดเมียมในท่อลำเลียงอาหารจะน้อยกว่าอัตราการเคลื่อนย้ายในท่อลำเลียงน้ำ ส่งผลให้เมล็ดข้าวกล้องมีการสะสมแคดเมียมน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับต้นและใบ ปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของพืชมีแนวโน้มเรียงจากมากไปหาน้อยมีดังนี้ ลำต้น ใบ และเมล็ดข้าว ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Zhao *et al.* (2009) พบว่าปริมาณการสะสมแคดเมียมในส่วนต่าง ๆ ของพืชสามารถเรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ ราก ตอซัง และเมล็ด

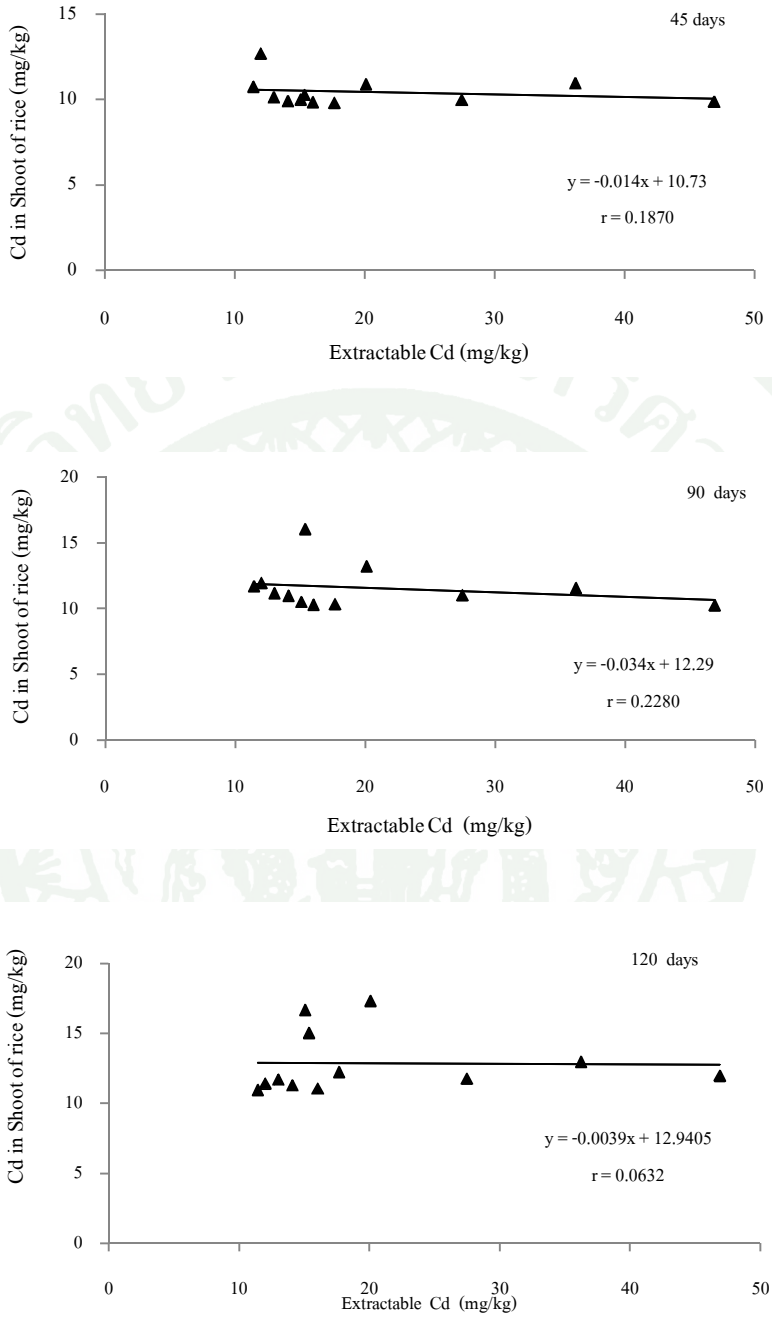
เมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินก่อนปลูกกับน้ำหนักแห้งต่อกอของข้าวที่อายุ 45 90 และ 120 วัน ตามลำดับ ไม่พบความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งผลการศึกษาที่ได้ไม่สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ สรัตนา (2548) ที่พบว่าข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ปลูกในดินที่ไม่มีการปนเปื้อนเปรียบเทียบกับดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมมีผลทำให้น้ำหนักแห้งของตอซังลดลงจาก 65.30 เป็น 7.41 กรัมต่อกระถาง เนื่องจากในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาในดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมเท่านั้น ไม่ได้มีการปลูกในสภาพดินที่ไม่มีการปนเปื้อนแคดเมียม (control) จึงไม่สามารถเปรียบเทียบได้อย่างชัดเจนถึงความสัมพันธ์ระหว่างแคดเมียมที่สกัดได้ในดินก่อนปลูกกับน้ำหนักต่อกอของข้าวแต่มีรายงานเกี่ยวกับผลของแคดเมียมต่อการเจริญเติบโตของพืชโดย Das *et al.* (1997) รายงานว่าแคดเมียมมีผลทำให้พืชแคระแกร็น เนื่องจากแคดเมียมเข้าจับกับเอมไซม์ในกระบวนการสังเคราะห์ทริพโทเฟนซึ่งเป็นสารตั้งต้นของฮอร์โมนออกซิน (Liu *et al.*, 2003) ซึ่งฮอร์โมนออกซินมีหน้าที่ในการควบคุมการขยายตัวของเซลล์และกระตุ้นการแบ่งเซลล์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



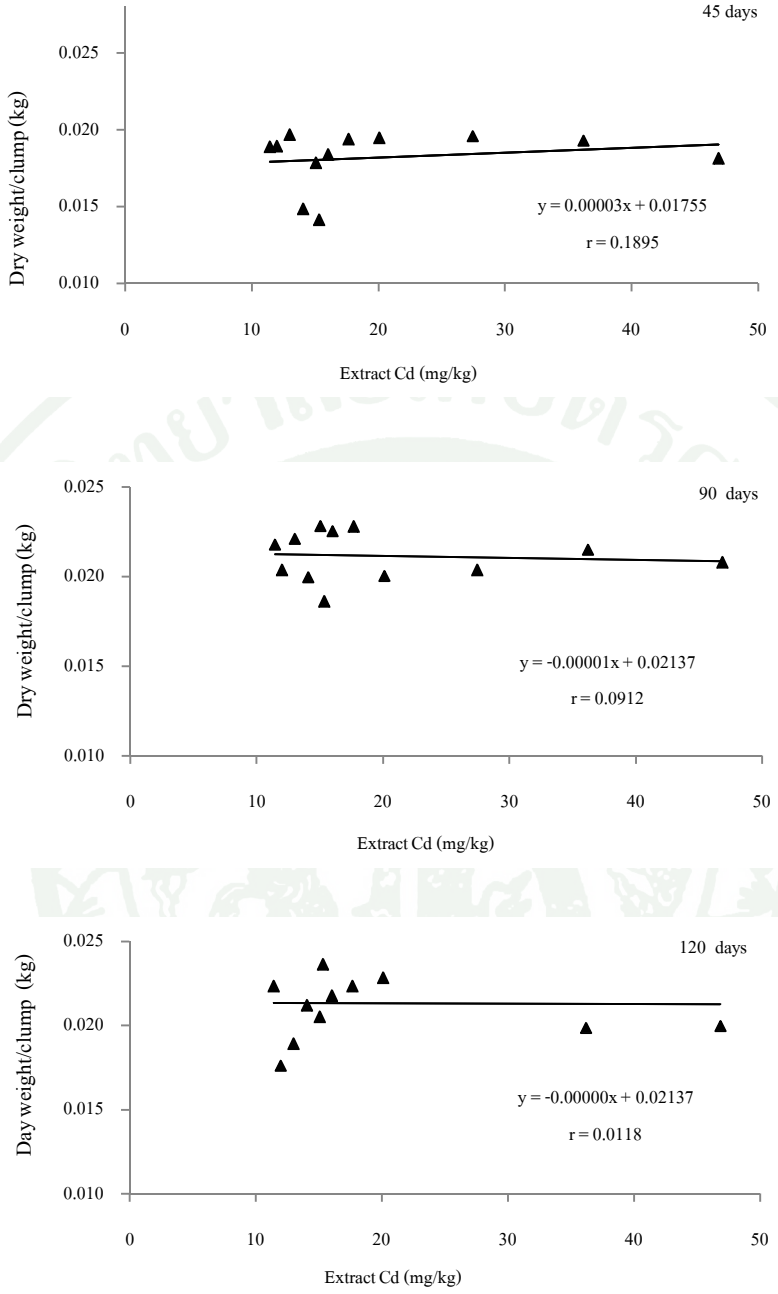
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดิน และความสูงของข้าวที่อายุ 45 90 และ 120 วัน ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ห่างปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินก่อนปลูกและการสะสมแคดเมียมในส่วนเหนือดินของข้าวที่อายุ 45 90 และ 120 วัน ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดิน กับน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินของข้าวที่อายุ 45 90 และ 120 วัน ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของดินที่ศึกษาหลังเก็บเกี่ยวผลผลิตแสดงใน ตารางที่ 22 โดยพบว่า ค่าปฏิกิริยาดิน (pH) ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) ปริมาณฟอสฟอรัสเป็นประโยชน์ (Available P) และโพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable K) ในแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อนำมาประเมินตามรายงานของกองสำรวจดิน (2523) พบว่าปฏิกิริยาดินอยู่ในช่วงกรดจัดมากถึงด่างเล็กน้อย (5.14-7.33) มีปริมาณอินทรียวัตถุในดินอยู่ในระดับปานกลางถึงค่อนข้างต่ำ (2.00-1.63 %) และพบว่ามีปริมาณฟอสฟอรัสเป็นประโยชน์อยู่ในระดับปานกลางถึงสูงมากคือ 12.97-88.71 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่โพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้พบว่าอยู่ในระดับต่ำถึงสูงมากคือ 41.68-137.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินก่อนปลูกและหลังเก็บเกี่ยวผลผลิต (ภาพที่ 8) พบว่าปริมาณแคดเมียมที่พบมีแนวโน้มลดลงในทิศทางเดียวกันในทุกๆแปลงที่ศึกษา อีกวิธีคือกระบวนการดูดผ่านเนื้อเยื่อภายนอกของรากเข้าสู่ภายในรากโดย active absorbtion จึงใช้พลังงานจากการหายใจของรากทำให้เกิดการเคลื่อนผ่านระหว่างเซลล์ทาง plasmodesmata โดยมี vacuole เป็นแหล่งสะสมน้ำและประจุ การเคลื่อนที่ผ่านเซลล์เรียกว่า symplasm เนื่องจากเคลื่อนที่แบบ active absorption ซึ่งขึ้นกับกระบวนการหายใจ (ยงยุทธ, 2552) ส่วนปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินหลังเก็บเกี่ยวผลผลิตในแปลง 10_{EW} พบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินก่อนปลูกอาจเนื่องมาจากในน้ำที่เกษตรกรใช้ในการเพาะปลูกมีการปนเปื้อนแคดเมียม แต่เนื่องจากในการศึกษานี้ไม่ได้มีการเก็บตัวอย่างน้ำมาวัดปริมาณการปนเปื้อนแคดเมียมจึงยังไม่สามารถระบุได้อย่างแน่ชัด แต่ในการศึกษาพบว่าปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้ในดินมีปริมาณน้อยที่สุด ประกอบกับปริมาณอินทรียวัตถุในดินก่อนปลูกพบปริมาณสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแปลงอื่น (ตารางที่ 1) โดยผลของอินทรียวัตถุในดินต่อการดูดดึงแคดเมียมของพืชมีรายงานโดย Chaney (1982) ว่าการดูดดึงแคดเมียมจะลดลงเมื่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินเพิ่มโดยการเพิ่มปริมาณอินทรียวัตถุลงในดิน ปริมาณอินทรียวัตถุที่สูงในดินจะช่วยลดแคดเมียมในดินได้ เนื่องจากอินทรียวัตถุสามารถจับยึดแคดเมียมได้ดี จึงทำให้แคดเมียมจับยึดกับอินทรีย์ในดินมากขึ้นและพืชก็จะดูดดึงแคดเมียมเข้าไปได้น้อยลง เมื่อพืชดูดดึงแคดเมียมเข้าไปสะสมได้น้อยลงจะทำให้พืชสามารถดูดดึงธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ไปใช้ได้มากขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

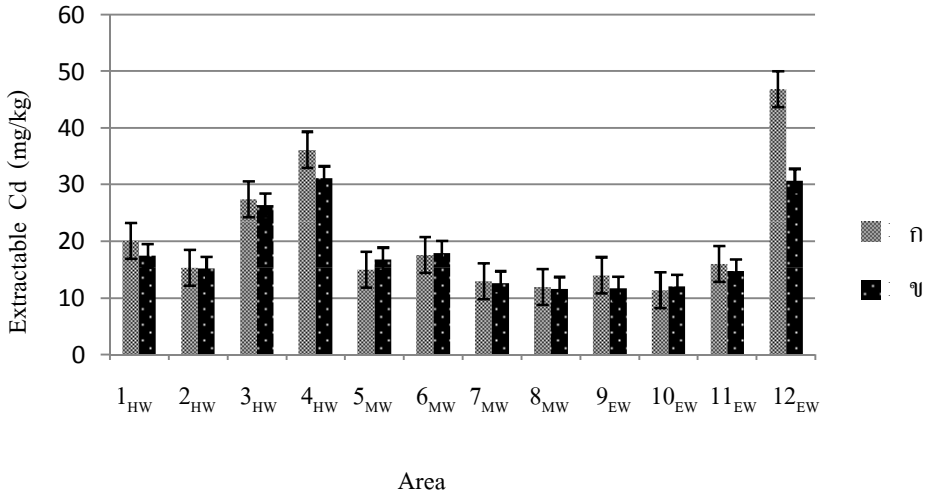
ตารางที่ 22 สมบัติดินบางประการและปริมาณแคดเมียมในดินหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต

Areas	pH (1:1)	OM (%)	Available P (mg/kg)	Exchangeable K (mg/kg)	Extractable Cd (mg/kg)
1_{HW}	6.51 b-c[1/]	1.98 a	30.88 e-g	100.90 d-e	17.50 b-c
2_{HW}	7.09 a-b	1.73 b	35.40 e-g	108.48 c	15.22 b-c
3_{HW}	6.69 a-b	1.84 a-b	24.95 f-g	95.04 f-g	26.45 a
4_{HW}	7.33 a	1.71 b	28.31 f-g	104.17 c-d	31.21 a
5_{MW}	5.14 e	1.72 b	43.55 d-f	94.54 g	16.85 b-c
6_{MW}	5.95 c-d	1.84 a-b	70.56 a-c	115.29 b	18.02 b
7_{MW}	5.69 d-e	1.77 ab	77.82 a-b	100.10 d-f	12.66 b-c
8_{MW}	5.69 d-e	1.81 a-b	64.09 b-d	137.08 a	11.65 c
9_{EW}	6.49 b-c	1.74 b	52.94 c-d	48.28 h	11.71 c
10_{EW}	6.42 b-c	2.00 a	12.97 g	44.85 h-i	12.07 b-c
11_{EW}	6.95 a-b	1.63 b	62.68 b-d	41.68 i	14.77 b-c
12_{EW}	6.94 a-b	1.78 a-b	88.71 a	97.79 e-g	30.75 a
F-test	**	**	**	**	**
CV %	10.34	6.02	47.85	32.97	39.49

หมายเหตุ ** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 %

[1/] ค่าเฉลี่ยที่ตามด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยวิธี DMRT

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 8 เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมในดินก่อนปลูก (ก) และหลังเก็บเกี่ยวผลผลิต (ข)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การปนเปื้อนแคดเมียมในดินนา บริเวณลุ่มน้ำแม่ตาว พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยพบการปนเปื้อนแคดเมียมสูงสุดคือ 46.87 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในแปลง 12_{EW} และในแต่ละกลุ่มพื้นที่ศึกษาพบว่าพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ มีปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยสูงที่สุด (24.78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานของสหภาพยุโรป (EU) ที่กำหนดไว้ว่าในดินไม่ควรมีปริมาณแคดเมียมเกิน 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และปริมาณแคดเมียมที่พบในครั้งนี้ไม่ได้ลดลงไปจากเดิม กับปริมาณแคดเมียมที่พบในปี 2543-2547

2. ปริมาณแคดเมียมที่พบในดินไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตทางด้านความสูงของต้นข้าวที่อายุต่างๆ แต่ปริมาณแคดเมียมที่สูงกว่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีผลทำให้ผลผลิตข้าวลดลงการสะสมแคดเมียมในข้าวสารและแกลบสูงสุดในแปลง 1_{HW} (9.27 และ10.42 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) และปริมาณแคดเมียมในทุกพื้นที่การศึกษา สูงกว่าค่ามาตรฐาน EU (< 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ข้อเสนอแนะ

ผลของการศึกษาการสะสมแคดเมียมของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่ตาว จังหวัดตาก ยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดถึงผลของแคดเมียมต่อการเจริญเติบโตของข้าว เนื่องจากไม่ได้ทดสอบปลูกข้าวในสภาพที่ไม่มีการปนเปื้อนแคดเมียมในดิน และการทดลองในสภาพแปลงถือเป็นสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ยาก เนื่องจากมีปัจจัยต่างๆมาเกี่ยวข้อง เช่น การบริหารจัดการของเกษตรกร สภาพอากาศ เป็นต้น แต่ผลการศึกษาครั้งนี้ได้แสดงให้เห็นถึงแนมโน้มของการลดลงของความสูงของข้าวและการลดลงของผลผลิต ในสภาพดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมสูงสุดเปรียบเทียบกับดินที่มีการปนเปื้อนแคดเมียมต่ำสุด (ที่วิเคราะห์ได้จากการทดลอง)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมการข้าว. 2555. **องค์ความรู้เรื่องข้าว**. แหล่งที่มา: www.ricethailand.go.th, 30 มีนาคม 2555.

กรมควบคุมมลพิษ. 2548. **การปนเปื้อนของสารแคดเมียมในลุ่มน้ำแม่ตาว อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก**. สถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ. 2547. กรุงเทพฯ.

กองสำรวจดิน. 2523. **คู่มือการจำแนกความเหมาะสมของที่ดินสำหรับพืชเศรษฐกิจ**. เอกสารวิชาการเล่มที่ 28 กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์การเกษตร.

เขมชิต ธนากิจชาญเจริญ, นงนาถ เมฆรังสิมันต์ และสุรชัย ศิลามณีโชติ. 2551. **ประโยชน์และความเป็นพิษของโลหะหนักแคดเมียม**. แหล่งที่มา: www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/cp_4_2551_ Cadmium.pdf, 18 กุมภาพันธ์ 2556

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์. 2549. **มาตรฐานมลพิษและการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมเหมืองแร่และโลหกรรมชนิดแร่สังกะสี จังหวัดตาก**. มหาวิทยาลัยมหิดล, นครปฐม.

ฉัตรสินี สุรเสน. 2545. **การกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการกรองด้วยเปลือกไข่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ทัศนีย์ อัตตะนันทน์. 2550. **ดินที่ใช้ปลูกข้าว**. พิมพ์ครั้งที่ 4 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

ธนัญพร ธรรมเจษฎา. 2554. **ผลกระทบของการใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตรต่อการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในห้วยแม่ตาว ประเทศไทย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหิดล

ประยุทธ สมบูรณ์. **การแพร่กระจายของแคดเมียมและสังกะสีในดินจากกิจกรรมเหมืองแร่สังกะสี : กรณีศึกษา เหมือง สังกะสี อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหิดล

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พิชิต พงษ์สกุล. 2545. **ผลการดำเนินงานชุดโครงการวิจัยสารปนเปื้อนในดินน้ำและพืช**, น. 127-133. *ใน* เอกสารประกอบการประชุมวิชาการประจำปี 2545. กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

เพื่อนจิต บุญจันทร์. 2548. **การสะสมแคดเมียมในข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 พันธุ์สุพรรณบุรี 1 พันธุ์พิษณุโลก 2 และพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในดินนาจากพื้นที่ ตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยนเรศวร.

ภาราดา มณีวงศ์. 2548. **การกระจายตัวของแคดเมียมในตะกอนท้องน้ำและตะกอนแขวนลอยบริเวณลุ่มน้ำแม่ตาว และลุ่มน้ำแม่กุ ในอำเภอแม่สอด จังหวัดตาก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2552. **ธาตุอาหารพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 3 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ยุทธชัย อนุรักติพันธุ์, บัณฑิต อนุรักษ์ และ ศุภาพิชญ์ ตั้งกองทรัพย์. 2545. **การปนเปื้อนของตะกั่ว แคดเมียมในดิน น้ำ และพืช จากบริเวณ ฝังกลบขยะมูลฝอย อ.เมือง จ.สุพรรณบุรี โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์,** น. 514-521 *ใน* รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41 สาขาวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วิไลภรณ์ ชนกนำชัย. 2552. **การปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105**. แหล่งที่มา: http://www.doae.go.th/library/html/detail/rice105/index.html, 15 กุมภาพันธ์ 2556.

ศิริลักษณ์ จันทร์โพธิ์. 2548. **การกระจายตัวและความสัมพันธ์ระหว่างแคดเมียมและสังกะสีในดินบริเวณลุ่มน้ำแม่กุ ตำบลแม่กุ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศุภมาศ พานิชศักดิ์พัฒนา. 2540. **ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี**. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. 2556. **การส่งออกข้าว**. แหล่งที่มา: http://www.thairiceexporters. or.th/, 15 กุมภาพันธ์ 2556.

สรัตนา เสนาะ. 2548. **การดูดดึงโลหะหนักของหญ้าแฝก ทานตะวัน และข้าว ที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุนิศา แสงจันทร์. 2543. **การศึกษารูปที่อาจเป็นพิษได้ของแคดเมียมและตะกั่วในดินในระบบบำบัดน้ำเสียแบบหญ้ากรอง.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์ และลัดดา วงศ์รัตน์. 2548. **การสะสมและถ่ายทอดแคดเมียมผ่านทางห่วงโซ่อาหารในแหล่งน้ำ**. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, กรุงเทพฯ.

สำนักงานจังหวัดตาก. 2549. **ข้อมูลทั่วไปของจังหวัดตาก**. แหล่งที่มา: http://123.242.165.138/tak_ poc/vitual/index.php, 21 เมษายน 2555

สงกรานต์ จิตรากร. 2544. **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกับข้าวไทย.** สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี: ข้าวกับวิถีชีวิตคนไทย. หน้า 13.

อนงนาฏ ศรีประโชติ. 2549. **การกระจายตัวของแคดเมียมในดินที่มีการปนเปื้อน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ. 2522. **อิทธิพลของตะกั่วและแคดเมียมต่อการเจริญเติบโตและองค์ประกอบทางเคมีของพืชอาหารสัตว์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Amacher, C.M. 1996. Nickel, Cadmium and Lead, pp. 739-768. *In* Sparks D.L., eds. Methods of Soil Analysis: **Chemical Methods**, Part 3-SSSA Book Series no.5. Soil Science. Am. Amer. Soc. of Agron. Madison, WI, USA.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Anongnat S., P. Kanyawongha, K. Ochiai and T. Matoh. 2012. Current situation of cadmium-polluted paddy soil, rice and soybean in the Mae Sot District, Tak Province, Thailand. **Soil Sci. Plant Nutr.** 58 (3): 349-359.

Asami, T. 1997. Cadmium pollution of paddy field and human health in land, pp. 217-264, *In* Adriano, D.C., eds. **Biogeochemistry of Trace Metals**. Science Reviews, Northwood.

Balestrasse , K. B., B. P. Maria, G.M. Susana and T.L. Maria. 2003. Effect of Cadmium Stresson Metabolism in Nodules and Root of Soybean Plants. **Functional Plant Biol.** 30: 57-64.

Chaney, R.L. 1982. Fate of toxic substances in sludge applied to cropland Processings International Symposium Land Application of Sewage Sluge., Cited by Kuntz, H., Pluquet, E.,Stark, J.H. and Coopoia, S.Current Techniques for the Evaluation of Metal Problems due to Sludge. pp.394-403 *In* Hermite, P.L. and H. Ott, eds. **Processing and Use of Sewage**. Sludge. Holiand: D. Redal.

Chaney, R. L., Y. Li, S.L. Brown, F.A. Homer, M. Malik, J. S. Angle, J.M. Baker, D. Reeves and M. Chin. 2000. Improving metal hyperaccumulator wild plants to develop commercial phytoextraction systems : approaches and progress, pp. 129-158. *In* Terry, N. and G. Banuelos, eds. **Phytoremediation of Contaminated Soil and Water.** Lewis Publ. Washington, D.C.

Chaney, R.L., P.G. Reeves and J.S. Angle. 2001. Rice plant nutrition and human nutritional characteristics roles in human Cd toxicity, pp. 288-289. *In* Horst, W.J., eds. **Plant Nutrition :Food security and sustainability of agro ecosystem trough basis and applied research**. Kluwer Academic Publ., Dordrecht.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Chen , Z.S. 1992. Metal contamination of flooded soils, rice plants and surface water in Asia, pp. 85-109. *In* Adriano, D.C., eds. **Biogeochemistry of Trace Meters**, Lewis Publ., London.

Culter, J.M. and D.W. Rain. 1974. Characterization of cadmium uptake by plant tissue. **Plant Physiol.** 54: 67-71.

Das, P., S. Samantaray and G.R. Rout. 1997. Studies on cadmium toxicity in plant : a review. **Environ. Pollut.** 98 (1): 29-36.

Diaz, M.A., and A. Polo. 1988. Effect of two sewage sludge in the rye-grass yield and nutrient content, pp. 428-430 *In* Orio A.A., eds. **Environmental contamination**. Edinburgh, CEP Consultants.

Faithfull, N.T. 2002. **Methods in Agricultural Chemical Analysis: A Practical Handbook**. CABI Publishing, UK.

Genevini, P.L., P. Zaccheo, A. Garbarino, and V. Mezzanotte. 1984. Utilization and agricultural value of dried digested sewage slugde from a domestric and industrial sewage plant. pp. 306-309. *In* Hormite P.L., and H. Ott, eds. **Processing and use of sewage sludge**. D. Reidal Publishing Company.

Jung, M.C., and I. Thornton. 1996. Heavy metal contamination of siols and plants in the vicinity of a lead-zinc mine, Korea. **Appli. Geochem.** 11: 53-59.

Karnchanawong, S., A. Silprasert, R. Keawvichit, and T. Prapamontol. 2002. Contamination levels of crops Irrigated by effluent from Domestic Wastewater Treatment Plant**.** *In* **Proceedings of the International Symposium on Lowland Technology**. 18-20 September. Saga University, Saga, Japan.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Kirkham, M.B. 2006. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. **Geoderma** 137: 19-32.

Liu, J., K. Li, J. Xu, J. Liang, X. Lu, J. Yang and Q. Zhu. 2003. Interaction of Cd and five mineral nutrients for uptake and accumulation in different rice cultivars and genotypes. **Field Crops Res.** 83: 271-281.

Pankovic ,D., M. Plesnicar, I.M. Arsenijevic, N. Petrovic, Z. Sakac and R. Kastori. 2000. Effect of Nitrogen Nutrition on Photosynthesis in Cd-Treated Sunflower Plants. **Annuals of Botany** 86(4): 841-847.

Page, A.L., and F.J. Bingham, 1973. Cadmium residues in the Environment. **Res. Rev.** 48: 1-44.

Peligard, K. 1986. Heavy metal uptake from the soil in four seed plants. **Botanisk Tidsskrift** 73: 167-175.

Pramoon, W. 2005. **Cadmium Accumulation in Water Spinach Grown in Cadmium Contaminated Water**. M.S. Thesis, Chulalongkorn University.

Simmons, R.W., P. Pongsakul, D. Saiyasitpanich, and S. Klinphoklap. 2003. 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. **Environ. Geochem.** 27: 501-511.

Singh, B.R., and M.J. McLaughlin. 1999. Cadmium in Soils and Plants. pp. 257-267 *In* Launghlin M.J. and B.R. Singh, eds. **Cadmium Soils and Plants**. Kluwer Academic, Dordrecht.

Siriporndulsil, S., S. Traina, S.P. Verma and R.T. Sayre. 2002. Molecular Mechanism of Proline-Mediated Tolerance to Toxic Heavy Metals in Transgenic Microalgae. **The Plant Cell** 14: 2837-2847.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Sparks, D.L., A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soluanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston and M.E. Sumner. 1996. **Method of Soil Analysis Part 3 Chemical Method.** Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy and Inc., Madison,Wisconsin, USA.

Takijima Y, and F. Katsumi. 1973. Cadmium contamination of soils and rice plants caused by zinc mining I.Production of high cadmium rice on the paddy fields in lower reaches of the mine station. **Soil Sci. Plant Nutr.** 19: 29-38.

Taylor, M.D. and H.J. Percival. 2001. Cadmium in soil solutions from a transect of soils away from a fertilizer bin. **Environ. Pollut**. 113: 35-40.

Walkley, A and I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Sci.** 37: 29-38.

Yanagisawa M.,Y. Shinmura, N. Yamada, A. Segawa and K. Kida. 1984. Heavy metal pollution and methods of restoration of polluted soil in the Jinzu River basin. Bull. **Toyama Agriculture Exp**. Stn.15: 1-110 in Japanese with English summary.

Zhao, X., D. Deming, H. Xiuyi and D. Shoufei. 2009. Investigation of the transport and fate of Pb, Cd, Cr and As in soil zones derived from moderately contaminated farmland in Northeast, China. **Hazardous Material** 170: 570-577.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 1 ตำแหน่งบนพื้นที่ปลูกข้าวต้นน้ำ

Areas	Symbol	Replication	Point	
			N	E
Head watershed area; HW	1_{HW}	1	1842821	458710
		2	1842808	458790
		3	1842888	458813
		4	1842884	458757
Head watershed area; HW	2_{HW}	1	1842799	458628
		2	1842768	458603
		3	1842744	458605
		4	1842697	458607
Head watershed area; HW	3_{HW}	1	1842823	458545
		2	1842865	458528
		3	1842854	458574
		4	1842856	458612
Head watershed area; HW	4_{HW}	1	1842908	458626
		2	1842919	458602
		3	1842927	458573
		4	1842933	458542

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 2 ตำแหน่งบนพื้นที่ปลูกข้าวกลางน้ำ

Areas	Symbol	Replication	Point	
			N	E
Middle watershed area; MW	5_{MW}	1	1843638	455554
		2	1843699	455548
		3	1843691	455569
		4	1843661	455566
Middle watershed area; MW	6_{MW}	1	1843677	455604
		2	1843693	455587
		3	1843696	455609
		4	1843655	455606
Middle watershed area; MW	7_{MW}	1	1843634	455666
		2	1843615	455659
		3	1843614	455756
		4	1843575	455754
Middle watershed area; MW	8_{MW}	1	1843286	456156
		2	1843269	456201
		3	1843344	456215
		4	1843355	456172

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 3 ตำแหน่งบนพื้นที่ปลูกข้าวปลายน้ำ

Areas	Symbol	Replication	Point	
			N	E
End of watershed area; EW	9_{EW}	1	1844281	454378
		2	1844277	454418
		3	1844199	454405
		4	1844210	454357
End of watershed area; EW	10_{EW}	1	1844244	454427
		2	1844224	454491
		3	1844168	454473
		4	1844178	454434
End of watershed area; EW	11_{EW}	1	1844258	454159
		2	1844247	454205
		3	1844237	454255
		4	1844226	454296
End of watershed area; EW	12_{EW}	1	1844200	454544
		2	1844172	454576
		3	1844119	454554
		4	1844132	454528

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 4 การประเมินระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินจากผลการวิเคราะห์ดิน (กองสำรวจดิน, 2523)

Soil Fertilizer	OM (%)	BS (%)	CEC ($cmol_c/kg$)	Avai. P (mg/kg)	Exch. K (mg/kg)
Low	<1.5	<35	<10	<10	<60
	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
Medium	1.5-3.5	35-75	10-20	10-25	60-90
	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
Hight	>3.5	>75	>20	>25	>90
	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)

หมายเหตุ วิธีคาดคะเนระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยประเมินจากผลการวิเคราะห์ดินดังนี้ ตัวเลขคะแนนอยู่ในวงเล็บในตารางนี้ หากรวมกันมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่า 7 ถือว่า ดินมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ถ้ามีคะแนนอยู่ระหว่าง 8 ถึง 12 ถือว่าดินมีความอุดมสมบูรณ์ปานกลาง ถ้ามีคะแนนเท่ากับหรือมากกว่า 13 ถือว่าดินมีความอุดมสมบูรณ์สูง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ 5 ชั้นมาตรฐานระดับปฏิกิริยาของดิน (Soil reaction, pH) ดิน : น้ำ (1:1)

Level	pH
very extremely acid	< 4.0
extremely acid	4.0-4.4
very stongly acid	4.6-5.0
stongly acid	5.1-5.5
medium acid	5.6-6.0
slightly acid	6.1-6.5
neutral	6.6-7.3
midly alkaline	7.4-7.8
moderately alkaline	7.9-8.4
strongly alkaline	8.5-9.0
very Strongly alkaline	> 9.0

ที่มา: Land Classification Division and FAO Project Staff (1973)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายธนภัทร ปลื้มพวก
วัน เดือน ปี ที่เกิด	19 มีนาคม 2528
สถานที่เกิด	อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัดราชบุรี
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เกษตรศาสตร์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	เจ้าหน้าที่วิจัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ฝ่ายปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์