



สถานะสารหนูและการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตลดความเป็นพิษของสารหนู
ในดินปลูกข้าว จากอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช
**Status of Arsenic and Application of Triple Superphosphate to Alleviate
Arsenic Toxicity in Rice Growing Soil from Ronphibun District,
Nakhon Si Thammarat Province**

จิราภรณ์ แก้วล่องลอย
Jiraporn Kaewlongloi

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรดิน
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Soil Resources Management
Prince of Songkla University**

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



สถานะสารหนูและการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตลดความเป็นพิษของสารหนู
ในดินปลูกข้าว จากอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช
**Status of Arsenic and Application of Triple Superphosphate to Alleviate
Arsenic Toxicity in Rice Growing Soil from Ronphibun District,
Nakhon Si Thammarat Province**

จิราภรณ์ แก้วล่องลอย
Jiraporn Kaewlongloi

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรดิน
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Soil Resources Management
Prince of Songkla University**

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ สถานะสารหนูและการใช้ทริบเปิดซูเปอร์ฟอสเฟตลดความเป็นพิษของ
 สารหนูในดินปลูกข้าว จากอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช
ผู้เขียน นางสาวจิราภรณ์ แก้วส่องลอย
สาขาวิชา การจัดการทรัพยากรดิน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (ดร.ขวัญตา ขาวมี)ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์)
กรรมการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	(ดร.ขวัญตา ขาวมี)
.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จำเริญ อ่อนทอง)	(รองศาสตราจารย์ ดร.จำเริญ อ่อนทอง)
กรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ ชุมทอง)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรดิน

.....
 (ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งสว่าง)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(ดร.ขวัญตา ขาวมี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ

(รองศาสตราจารย์ ดร.จำเริญ อ่อนทอง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นางสาวจิราภรณ์ แก้วล่องลอย)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวจิราภรณ์ แก้วส่องลอย)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	สถานะสารหนูและการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตลดความเป็นพิษของสารหนูในดินปลูกข้าว จากอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช
ผู้เขียน	นางสาวจิราภรณ์ แก้วล่องลอย
สาขาวิชา	การจัดการทรัพยากรดิน
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นพื้นที่เคยทำเหมืองแร่ดีบุก ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนสารหนูในดิน จึงศึกษาสมบัติดินและระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูต่อรูปสารหนูในดิน โดยเก็บตัวอย่างดินจำนวน 23 บริเวณ ที่ 0.5–6.0 กิโลเมตร จากแหล่งกำเนิดสารหนู โดยทำการวิเคราะห์สมบัติดินและรูปสารหนู และศึกษาการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโต การดูดใช้สารหนู และธาตุอาหารในข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนสารหนู โดยทดลองใส่ปุ๋ยฟอสเฟตในระดับต่าง ๆ ในดินที่มีสารหนูระดับแตกต่างกัน พบว่า ดินมีสารหนูทั้งหมดสูงเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานในดินทำการเกษตรในประเทศไทย สารหนูในดินบนอยู่ในรูปที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์สัดส่วนมากที่สุดและพบสารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจงน้อยที่สุด นอกจากนี้ พบความสัมพันธ์สูงระหว่างผลรวมของสารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจงและที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจงกับสารหนูที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง ($r=0.997^{**}$) และพบความสัมพันธ์ระหว่างสารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจงและที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจงกับอินทรีย์วัตถุ ในโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ในขณะที่สารหนูทั้งหมด สารหนูรูปที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจง และที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจงลดลงเมื่อเพิ่มระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนู เห็นได้ว่าสารหนูในรูปที่มีศักยภาพในการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมสูงในพื้นที่ที่ศึกษา ดินที่มีสารหนูสูง (20 mg kg^{-1}) จะเป็นพิษต่อข้าวในช่วงระยะแตกกอและต้นข้าวตายก่อนเก็บเกี่ยวแต่ในดินที่มีสารหนูต่ำ (10 mg kg^{-1}) แสดงอาการในช่วงสร้างช่อดอกอ่อน การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตในดินที่มีสารหนูสูงไม่สามารถลดความเป็นพิษของสารหนูในข้าวได้ ทำให้การเจริญเติบโตและการดูดใช้ธาตุอาหารลดลง ในขณะที่ในดินที่มีสารหนูต่ำ มีแนวโน้มการเจริญเติบโต การดูดใช้ธาตุอาหารเพิ่มขึ้น และสารหนูในเมล็ดลดลง ดังนั้น การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตลดความเป็นพิษของสารหนูเป็นวิธีที่เหมาะสมกับดินที่มีการปนเปื้อนสารหนูต่ำได้

Thesis Title	Status of Arsenic and Application of Triple Superphosphate to Alleviate Arsenic Toxicity in Rice Growing Soil from Ronphibun District, Nakhon Si Thammarat Province
Author	Miss Jiraporn Kaewlongloi
Major Program	Soil Resources Management
Academic Year	2018

ABSTRACT

Ronphibun District, Nakhon Si Thammarat Province, was tin mining area and resulted in arsenic (As) contamination in soils. Soil properties and distance from As source on As fractionation were studied. Soil samples from 23 areas at 0.5 to 6.0 km from As source were collected. Soil properties and As fractionations were determined. Moreover, the study was aimed to investigate the effect of phosphate fertilizer on growth, As and nutrient uptake of rice. The different levels of phosphate were added to soil with different levels of As. Soil had high total As concentration when compared with critical level of As in agricultural soil in Thailand. Arsenic fractionations in topsoil were mostly partitioned in the amorphous and poorly-crystalline hydrous oxides of Fe and Al fraction and non-specifically adsorbed fraction was the lowest. Moreover, high correlation between sum of non-specifically and specifically adsorbed with specifically adsorbed fraction ($r = 0.997^{**}$) was found and correlation between of non-specifically and specifically adsorbed fractions with some soil properties such as organic matter, total N and available P were found. Whereas, total As, non-specifically and specifically adsorbed fractions decreased with increasing distance from As source. The results indicated that As fractions as potential release to the environment had high. The soil with high As concentration (20 mg kg^{-1}) showed As toxicity symptom in rice during tillering stage and rice was dead before the harvesting stage but in the soil with low As concentration (10 mg kg^{-1}) showed As toxicity symptom in rice during panicle initiative stage. Application of phosphate fertilizer in soil with high As concentration did not alleviate As toxicity in rice, plant growth and nutrients uptake were decreased but in soil with low As concentration found that plant growth and nutrients uptake tended to increase and As in grain decreased. Therefore, application of phosphate fertilizer to alleviate As toxicity is a suitable strategy in soil with low As concentration.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ดร.ขวัญตา ขาวมี ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และรองศาสตราจารย์ ดร.จำเป็น อ่อนทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาเสียสละเวลา ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ตั้งแต่เริ่มต้น ด้วยการให้คำปรึกษา คำแนะนำ ให้กำลังใจ และข้อคิดในด้านต่าง ๆ ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไข จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์และสำเร็จลุล่วงได้ดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ ชุมทอง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแก้ไขข้อบกพร่องในด้านการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาธรณีศาสตร์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้และวิชาการด้านต่าง ๆ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาธรณีศาสตร์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ ขอขอบคุณเจ้าของพื้นที่ดินที่ได้สละดินสำหรับทำการศึกษาในครั้งนี้และขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ภาควิชาธรณีศาสตร์ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ งานวิจัยประเภทการทดลองทางวิทยาศาสตร์

จิราภรณ์ แก้วล่องลอย

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(9)
รายการรูป	(11)
บทที่	
1. บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
การตรวจเอกสาร	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	15
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	15
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	16
วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือวิทยาศาสตร์	16
สารเคมีสำหรับวิเคราะห์	17
วิธีการทดลอง	19
3. ผลการทดลอง	30
4. วิเคราะห์ผลการทดลอง	68
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	76
เอกสารอ้างอิง	78
ประวัติผู้เขียน	93

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ระดับค่ามาตรฐานของสารหนูในดินประเทศต่าง ๆ	4
2.1	การวิเคราะห์รูปของสารหนูด้วยวิธีการสกัดตามลำดับชั้น	20
2.2	การใส่สารหนูและปุ๋ยในแต่ละตำรับการทดลอง (การทดลองย่อยที่ 1)	24
2.3	การใส่สารหนูและปุ๋ยในแต่ละตำรับการทดลอง (การทดลองย่อยที่ 2)	24
2.4	การใส่ปุ๋ยในแต่ละตำรับการทดลอง (การทดลองย่อยที่ 3)	25
3.1	สมบัติทางเคมีของดินบน (n=23) และดินล่าง (n=71) ที่ปนเปื้อน สารหนู จำนวน 23 บริเวณ	31
3.2	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสารหนูรูปต่าง ๆ ในดินบน	34
3.3	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสารหนูรูปต่าง ๆ ในดินบนกับสมบัติของ ดิน	34
3.4	ค่าวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง	38
3.5	ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (20 mg kg ⁻¹) ต่อ สมบัติทางเคมี ของดินหลังสิ้นสุดการทดลอง	39
3.6	ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg ⁻¹) ต่อ สมบัติทางเคมี ของดินหลังสิ้นสุดการทดลอง	39
3.7	ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อสมบัติทางเคมีของดินหลัง สิ้นสุดการทดลอง	40
3.8	ผลการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (20 mg kg ⁻¹) ต่อ ความสูงของข้าว	43
3.9	ผลการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (20 mg kg ⁻¹) ต่อ จำนวนกอของข้าว	43
3.10	ผลการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (20 mg kg ⁻¹) ต่อ น้ำหนักแห้งของข้าว	44
3.11	ผลการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg ⁻¹) ต่อ ความสูงของข้าว	46
3.12	ผลการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg ⁻¹) ต่อ จำนวนกอ และความยาวของรวงข้าว	46

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3.13	ผลการใช้ทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg^{-1}) ต่อ น้ำหนักแห้งของข้าว	47
3.14	ผลการใช้ทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟต (ไม่ใส่สารหนู) ต่อความสูงของข้าว	49
3.15	ผลการใช้ทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟต (ไม่ใส่สารหนู) ต่อจำนวนกอและ ความยาวของรวงข้าว	49
3.16	ผลการใช้ทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟต (ไม่ใส่สารหนู) ต่อน้ำหนักแห้งของ ข้าว	50
3.17	ผลของการใช้ทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (20 mg kg^{-1}) ต่อ ความเข้มข้นของธาตุอาหารในราก+ตอซังของข้าว	51
3.18	ผลของการใช้ทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg^{-1}) ต่อ ความเข้มข้นของสารหนูและธาตุอาหารในรากของข้าว	52
3.19	ผลของการใช้ทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg^{-1}) ต่อ ความเข้มข้นของธาตุอาหารในตอซังของข้าว	53
3.20	ผลของการใช้ทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg^{-1}) ต่อ ความเข้มข้นของธาตุอาหารในเมล็ดของข้าว	53
3.21	ผลของการใช้ทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟต (ไม่ใส่สารหนู) ต่อความเข้มข้น ของธาตุอาหารในรากของข้าว	54
3.22	ผลของการใช้ทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟต (ไม่ใส่สารหนู) ต่อความเข้มข้น ของธาตุอาหารในตอซังของข้าว	55
3.23	ผลของการใช้ทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟต (ไม่ใส่สารหนู) ต่อความเข้มข้น ของธาตุอาหารในเมล็ดของข้าว	55

รายการภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	การรับและลำเลียงอาร์เซนไนต์เข้าสู่ต้นข้าว	11
2.1	จุดตัวอย่างดินบริเวณที่ศึกษาในอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช	21
3.1	ไต่อะแกรมแสดงการแจกกระจายของร้อยละอนุภาคทราย อนุภาคทรายแป้ง และอนุภาคดินเหนียวของดินบน (n=23) (A) และดินล่าง (n=71) (B)	31
3.2	สารหนูทั้งหมดในดินบนและดินล่างที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแตกต่างกัน	32
3.3	ความเข้มข้นของสารหนูรูปต่าง ๆ ในดินบน	33
3.4	ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูต่อความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดในดินบน (n=23) (A) และดินล่าง (n=71) (B)	36
3.5	ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูต่อรูปของสารหนูในดินบน (n=12) (A) และร้อยละของสารหนูรูปต่าง ๆ เมื่อเทียบกับสารหนูทั้งหมดในดินบน (B)	37
3.6	ผลของสารหนูต่ออาการเป็นพิษของข้าว	41
3.7	ผลการใช้ทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (20 mg kg^{-1}) ต่อการเจริญเติบโตของข้าวในช่วงระยะแตกกอ (A) ระยะสร้างช่อดอกอ่อน (B) ระยะโผล่ช่อดอกและเกสร (C) และระยะเก็บเกี่ยว (D)	42
3.8	ผลการใช้ทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg^{-1}) ต่อการเจริญเติบโตของข้าวในช่วงระยะแตกกอ (A) ระยะสร้างช่อดอกอ่อน (B) ระยะโผล่ช่อดอกและเกสร (C) และระยะเก็บเกี่ยว (D)	45
3.9	ผลการใช้ทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของข้าวในช่วงระยะแตกกอ (A) ระยะสร้างช่อดอกอ่อน (B) ระยะโผล่ช่อดอกและเกสร (C) และระยะเก็บเกี่ยว (D)	48
3.10	ผลของทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้ในโตรเจนในราก+ตอซัง	56
3.11	ผลของทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้ฟอสฟอรัสในราก+ตอซัง	57
3.12	ผลของทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้โพแทสเซียมในราก+ตอซัง	57
3.13	ผลของทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้แคลเซียมในราก+ตอซัง	58
3.14	ผลของทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้แมกนีเซียมในราก+ตอซัง	58

รายการภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.15	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้สังกะสีในราก+ตอซัง	59
3.16	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้สารหนูในราก+ตอซัง	59
3.17	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้ในโตรเจนในรากและตอซัง	60
3.18	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้ฟอสฟอรัสในราก ตอซัง และเมล็ด	61
3.19	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้โพแทสเซียมในราก ตอซัง และเมล็ด	61
3.20	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้แคลเซียมในราก ตอซัง และเมล็ด	62
3.21	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้แมกนีเซียมในราก ตอซัง และเมล็ด	62
3.22	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้สังกะสีในราก ตอซัง และเมล็ด	63
3.23	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้สารหนูในราก ตอซัง และเมล็ด	63
3.24	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้ในโตรเจนในราก ตอซัง และเมล็ด	64
3.25	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้ฟอสฟอรัสในราก ตอซัง และเมล็ด	64
3.26	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้โพแทสเซียมในราก ตอซัง และเมล็ด	65
3.27	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้แคลเซียมในราก ตอซัง และเมล็ด	65
3.28	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้แมกนีเซียมในราก ตอซัง และเมล็ด	66
3.29	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้สังกะสีในราก ตอซัง และเมล็ด	66
3.30	ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้สารหนูในราก ตอซัง และเมล็ด	67

บทที่ 1

บทนำ

1. บทนำต้นเรื่อง

ประเทศไทยมีพื้นที่ปนเปื้อนสารหนูถึง 25 จังหวัด (พิชญ์นิภา และวัลย์รัตน์, 2556) เช่น จังหวัดเลย ลำปาง สุพรรณบุรี พิจิตร และนครศรีธรรมราช โดยเฉพาะที่ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ พบว่า มีการปนเปื้อนสารหนูในดินสูง เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่เคยมีการทำเหมืองแร่ดีบุก (อานนท์, 2537) จากการรายงานปริมาณสารหนูในดินบริเวณพื้นที่นี้พบว่า ยังมีปริมาณสารหนูในดินสูง โดยมีรายงานว่า มีสารหนูทั้งหมด 31–247 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมวิชาการเกษตร, 2531) และในปี พ.ศ. 2545 พบสารหนูทั้งหมดในดินบริเวณเหมืองแร่ดีบุกสูงถึง 11,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Francesconi *et al.*, 2002) ซึ่งสูงกว่าระดับที่กำหนดในดินทำการเกษตรในประเทศไทย (3.9 mg kg^{-1}) (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2547) สมบัติของดินเป็นปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลต่อรูปของสารหนูที่จะสะสมและถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม (Redman *et al.*, 2002) มีรายงานพบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์กับปริมาณสารหนูรูปที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์สัณฐานและสารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผลึก (Krysiak and Karczewska, 2007; Hsu *et al.*, 2012) นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรดเป็นด่างของดินกับสารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจง (Wenzel *et al.*, 2001) นอกจากสมบัติของดินแล้วยังพบว่า ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูเป็นอีกปัจจัยสำคัญต่อระดับสารหนูในดิน โดยมีรายงานว่าดินที่ปนเปื้อนสารหนูบริเวณอดีตพื้นที่ทำเหมือง Terrubias ที่ระยะห่าง <10 เมตร พบสารหนูทั้งหมดสูงกวาระยะห่าง 10–100 เมตร (Otones *et al.*, 2011) เช่นเดียวกับ Garcia-Sanchez and Alvarez-Ayuso (2003) รายงานว่าระยะใกล้แหล่งกำเนิดสารหนู (<10 m.) พบสารหนูทั้งหมดสูงกวาระยะไกล (50–500 m.) เนื่องจากสารหนูจากแหล่งกำเนิดสามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินชะล้างและพัดพาสารหนูไปสะสมบริเวณพื้นที่ราบ (Visoottiviseth *et al.*, 2002) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ สัตว์ และพืช สารหนูเมื่อสะสมในพืชจะส่งผลต่อการเจริญเติบโต เช่น เข้าไปทำลายเนื้อเยื่อของพืช โดยเฉพาะใบอ่อน ยอดอ่อน หรือลำต้น (Abedin and Meharg, 2002) จากรายงานบริเวณที่ปนเปื้อนสารหนูสูงในตำบลร่อนพิบูลย์ พบการสะสมของสารหนูในรูปอาร์เซนิต อาร์เซนไนต์ กรดไดเมทิลอาร์ซีนิก และกรดโมโนเมทิลอาร์ซีนิก ในขม้น เท่ากับ 84.5, 14.5, 0.5 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์ หนาก เท่ากับ 60.0, 19.3, 20.7 และ 0.0 เปอร์เซ็นต์ มะพร้าว เท่ากับ 40.4, 47.8, 11.8 และ 0.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Francesconi *et al.*, 2002) และในข้าวมีความเข้มข้นของ

สารหนูในช่วง 0.291–1.361 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Phimol *et al.*, 2017) ส่งผลให้ชาวบ้านบริเวณพื้นที่ดังกล่าวมีโอกาสรับสารหนูเข้าสู่ร่างกายได้โดยตรงจากการบริโภคอาหารที่มีสารหนูสะสม เมื่อปลายปี 2530 พื้นที่อำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครราชสีมา พบว่า มีผู้ป่วยด้วยโรคพิษสารหนูเรื้อรังหรือโรคไขดำเป็นจำนวนมาก มีการสะสมสารหนูในร่างกายเกินค่ามาตรฐาน ($>0.01 \text{ mg kg}^{-1}$) (สุวลีย์, 2539)

จากรายงานส่วนใหญ่พบว่า การวิเคราะห์สารหนูในดินมักวิเคราะห์ในรูปสารหนูทั้งหมด ซึ่งมีรายงานว่าเป็นตัวชี้วัดความเป็นพิษไม่ดีนัก นักวิจัยจึงได้ให้ความสนใจกับสารหนูที่มีศักยภาพที่จะเคลื่อนย้ายได้ในดินหรือสารหนูในรูปที่มีศักยภาพในการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งวิธีที่ใช้ในปัจจุบันคือวิธีการสกัดตามลำดับขั้น (sequential extraction procedure; SEP) (Wenzel *et al.*, 2001; Taggart *et al.*, 2004; Smith *et al.*, 2008; Hoang and Hahn, 2015) ด้วยสารเคมีที่มีความรุนแรงเพิ่มขึ้นในแต่ละขั้นตอน ได้สารหนูในรูปต่าง ๆ ดังนี้ 1. สารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจง 2. สารหนูที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (สารหนู 2 รูปนี้มีศักยภาพที่จะปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม) 3. สารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ออสฐาน 4. สารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผลึก (สารหนู 2 รูปนี้ไม่สามารถปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย) และ 5. สารหนูส่วนที่เหลือ เป็นสารหนูส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในแร่ซิลิไฟต์และแร่ลูมิโนซิลิเกตยากต่อการสกัด (Kim *et al.*, 2014) การทราบปริมาณสารหนูรูปดังกล่าวข้างต้น โดยเฉพาะสารหนูในรูปที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจงและดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง หากพบว่าดินบริเวณนี้ยังมีสารหนูปริมาณสูง ก็ควรหาแนวทางในการจัดการสารหนูที่ปนเปื้อนในดินต่อไป

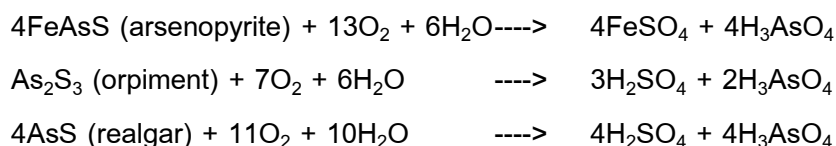
แนวทางการลดความเป็นพิษของสารหนูในดินมีหลายวิธี เช่น การใช้วัสดุคลุมดิน (ละออง และคณะ, 2550) การใช้พืชบำบัดสารหนู (พันธวัศ, 2558) การใช้วัสดุที่ทำให้เกิดการตกตะกอนของสารหนู (Hanada *et al.*, 1975) การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตช่วยลดสภาพความเป็นประโยชน์ของสารหนูต่อพืช จากรายงาน พบว่า การใช้ปุ๋ยอินทรีย์ฟอสฟอรัสช่วยลดความเป็นพิษของสารหนูในข้าวสาลีที่ทดลองในกระถางและลดการเคลื่อนย้ายสารหนูจากรากสู่เมล็ด (Pigna *et al.*, 2009) ความเข้มข้นของอินทรีย์ฟอสฟอรัสในสารละลายดินสูงสามารถยับยั้งการดูดใช้สารหนูในพืช (Lie *et al.*, 2012) ฟอสเฟตสามารถลดหรือเพิ่มการดูดใช้สารหนูในพืช ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปของสารหนูและชนิดของพืช (Otte *et al.*, 1990) อย่างไรก็ตาม การใช้ฟอสเฟตในดินที่ปนเปื้อนสารหนูไม่ได้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพอย่างชัดเจน โดยเฉพาะการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตในการลดความพิษของสารหนูในพืชที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Te, 2017)

จากรายงานการศึกษาสารหนูในอำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครราชสีมา พบว่า ไม่เคยมีการศึกษารูปของสารหนูดังกล่าวในดิน ดังนั้น จึงสนใจศึกษาสมบัติของดินและระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูต่อรูปของสารหนูในดินและการใช้ทริบิเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตลดความเป็นพิษของสารหนูในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1

2. การตรวจเอกสาร

2.1 สารหนูในดิน

สารหนู (arsenic; As) เป็นธาตุกึ่งโลหะ มีเลขอะตอม 33 น้ำหนักอะตอม 74.9216 กรัมต่อโมล จุดหลอมเหลวและจุดเดือด 613 และ 817 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ภายใต้ความดันบรรยากาศ 760 มิลลิเมตรปรอท (Sharma and Sohn, 2009) สารหนูแสดงเลขออกซิเดชันได้หลายค่าคือ +3, +5, 0 และ -3 แต่ส่วนใหญ่จะพบในรูปอาร์เซนไนต์ (As^{3+}) หรืออาร์เซนเนต (As^{5+}) โดยสารหนูเป็นองค์ประกอบของแร่ต่างๆ เช่น แร่อาร์เซนไพไรต์ (arsenopyrite; FeAsS) ออร์พิเมนต์ (orpiment; As_2S_3) และรีอัลการ์ (realgar; As_4S_4) หรืออาจพบในรูปสารประกอบออกไซด์ แร่เหล่านี้มักพบตามแหล่งแร่และมีอยู่ในหิน เมื่อมีการฟุ้งของหินหรือแร่ จะทำให้สารหนูสัมผัสกับอากาศและน้ำ จึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วเปลี่ยนสารหนูไปอยู่ในรูปของสารประกอบอาร์เซนเนต (Boyle and Jonasson, 1973) ดังสมการ



สารประกอบสารหนูสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ตามคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ (Cullen and Reimer, 1989) ดังนี้

1. สารประกอบอินทรีย์ (**organic arsenic compound**) ซึ่งประกอบด้วย กลุ่ม trivalent เช่น trimethylarsine [$(\text{CH}_3)_3\text{As}$], dimethylarsine [$(\text{CH}_3)_2\text{AsH}$] และกลุ่ม pentavalent เช่น dimethylarsinic acid [$(\text{CH}_3)_2\text{AsO}(\text{OH})$]

2. สารประกอบอนินทรีย์ (**inorganic arsenic compound**) ซึ่งประกอบด้วย กลุ่ม trivalent compounds เช่น arsenic trioxide (As_2O_3), arsenic trichloride (AsCl_3), sodium arsenite (NaAsO_2) และกลุ่ม pentavalent compounds (arsenate; As^{5+}) เช่น arsenic acid (H_3AsO_4) และ arsenic pentoxide (As_2O_5)

3. แก๊สอาร์ซีน (**arsine or arsenic hydride; AsH_3**) เกิดขึ้นเมื่อสารหนูทำปฏิกิริยากับน้ำ แก๊สนี้มีความเป็นพิษสูง ไม่มีสี ก่อให้เกิดการระคายเคือง

สารหนูพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ มักจะสะสมตัวอยู่ในหิน แหล่งแร่ ในรูปสารประกอบซัลไฟด์ของทองแดง ตะกั่ว สังกะสี พลวง เงิน และทอง ซึ่งมีปริมาณสารหนูบริเวณพื้นผิวโลกหรือเปลือกโลกประมาณ 1.5–2.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นับว่ามีมากเป็นอันดับที่ 20 เมื่อเทียบกับธาตุอื่นๆ (Bowen, 1979; Wedepohl, 1995; Krauskopf and Loague, 2002)

ตารางที่ 1.1 ระดับค่ามาตรฐานของสารหนูในดินประเทศต่างๆ

ประเทศ/หน่วยงาน	สารหนูทั้งหมด (mg kg ⁻¹)	อ้างอิง
ไทย	3.9	กรมควบคุมมลพิษ กระทรวง ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2547)
อเมริกาเหนือ	10	Walsh และ Keeney (1975)
เวียดนาม	12	Hoang และ Hahn (2015)
แคนาดา	14	Environment Canada (2002)
อังกฤษ	20	Environment Agency (2004)
สหภาพยุโรป	20	Leonard (1991)
สเปน	30	Novoa-Munoz และคณะ (2007)
องค์การอนามัยโลก	40	WHO (1981)

2.2 การแพร่กระจายของสารหนูในดินในพื้นที่อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช

การแพร่กระจายของสารหนูที่อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยมีแหล่งที่มาที่สามารถระบุได้ 2 บริเวณ คือ (1) พื้นที่ที่ผ่านการทำเหมืองแร่ดีบุกบนเขาร่อนนา และเขาสรวงจันทร์ และโรงแต่งแร่ซึ่งมีกองกากแร่สารหนู ที่เกิดจากการแยกแร่จะมีสารหนู เจือปนสูง 1–30 เปอร์เซ็นต์ และ (2) พื้นที่ราบตะกอนเชิงเขาและตะกอนน้ำพา ซึ่งมีสารหนูปนเปื้อนในระดับสูงกว่า 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่สำรวจ (อนงค์, 2540; กิตติยา, 2542) ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวได้มีการทำเหมืองแร่มานานกว่า 50 ปี บริเวณเขาสรวงจันทร์และเขาร่อนนาซึ่งเป็นเทือกเขาสูงต่อเนื่องจากทิศตะวันตกถึงทิศเหนือ มีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นหินแกรนิตซึ่งมีแร่มีสโคไวต์ (muscovite) และไบโอไทต์ (biotite) เป็นองค์ประกอบ และจะถูกดันตัวขึ้นมาสู่ผิวโลกได้นำเอาแร่ต่างๆ ขึ้นมาด้วย ทำให้เกิดสายแร่ควอตซ์ ดีบุก วุลแฟรม ไฟโรต์ อาร์เซนไพโรต์ และอิลเมไนต์ กลายเป็นสายแร่ที่มีขนาดกว้างประมาณ 10–40 เซนติเมตร ยาวประมาณ 10–30 เมตร ซึ่งพบว่ามีอยู่หลายสายเป็นแนวยาว ทำให้สารหนูที่อยู่ในรูปของแร่อาเซโนไฟโรต์ (FeAsS) เกิดการออกซิเดชันกับอากาศและน้ำ ส่งผลให้สารหนูที่อยู่ในแร่ถูกชะล้างโดยน้ำฝนจากการระบวนการตามธรรมชาติ ไหลลงสู่ห้วยร่อนนาผ่านชุมชนตำบลรัตนพิบูลย์ และไหลลงสู่ทะเลที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช (สุลีย์, 2539) จากการศึกษาปริมาณสารหนูในดินบริเวณพื้นที่ตำบลรัตนพิบูลย์ อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ในปี พ.ศ. 2534 พบว่า ตำบลรัตนพิบูลย์ (หมู่ 1, 2, 12 และ 13) มีสารหนูทั้งหมดในดินอยู่ในช่วง 59.95–5,209 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (อารีย์, 2534) จากรายงานการศึกษา

การแพร่กระจายของปริมาณสารหนูทั้งหมดในดิน พื้นที่อำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครราชสีมา พบว่า มีค่าการปนเปื้อนของสารหนูในดินอยู่ในช่วง 0.21–6.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ได้แก่ บริเวณห้วยหาน (1.50 mg kg⁻¹) เขาพนมเขียด (0.56 mg kg⁻¹) บ้านห้วยสัก (3.08 mg kg⁻¹) ควนเกย (1.50 mg kg⁻¹) บ้านหนองเป็ด (1.31 mg kg⁻¹) บ้านวังไทร (1.15 mg kg⁻¹) แหล่งแรยิบอินซอย (2.19 mg kg⁻¹) บ้านทุ่งโพธิ์ (1.75 mg kg⁻¹) บ้านปัดโวก (1.66 mg kg⁻¹) คลองคูหา (1.67 mg kg⁻¹) บ้านท้ายเรือ (0.21 mg kg⁻¹) บ้านม่วงงาม (1.76 mg kg⁻¹) และบริเวณที่พบการปนเปื้อนของสารหนูในดินสูง ได้แก่ บ้านนาจิก (6.25 mg kg⁻¹) ห้วยน้ำขุ่น (6.19 mg kg⁻¹) และที่ว่าการอำเภอรัตนบุรี (5.69 mg kg⁻¹) ซึ่งบริเวณพื้นที่ดังกล่าวนี้จะอยู่ใกล้กับเหมืองแร่ดีบุกและกองแร่อาร์เซนไฟไรต์ที่เกิดจากกระบวนการทำเหมืองแร่และแยกแร่ที่ถูกทิ้งตามผิวดิน (สุวลีย์, 2539) และจากรายงานปริมาณสารหนูทั้งหมดในดินบริเวณพื้นที่ทำการเกษตร อำเภอรัตนบุรี จำนวน 4 ตำบล ได้แก่ ตำบลรัตนบุรี (หมู่ 2, 3, 7, 12 และ 13) ตำบลควนพัง (หมู่ 3, 4 และ 6) ตำบลควนชุม (หมู่ 4 และ 7) และ ตำบลหินตก (หมู่ 1) พบว่า สารหนูทั้งหมดในดินชั้นบน (0-15 cm) อยู่ในช่วง 4.90–1,385, 0.11–18.20, 3.00–283.0 และ 2.30–37.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และดินชั้นล่าง (15-30 cm) สารหนูทั้งหมดในดินอยู่ในช่วง 9.60–1,549, 3.34–16.70, 3.10–163.0 และ 2.50–40.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (วรรณวิมล และคณะ, 2547) ซึ่งผลดังกล่าวมีแนวโน้มของการสะสมสารหนูในแต่ละพื้นที่สอดคล้องกับสารหนูที่พบในดินอยู่ในระดับสูง จะพบในพื้นที่หมู่ 2, 12 และ 13 มีปริมาณสารหนูทั้งหมดเฉลี่ยมากกว่า 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Sheppard, 1992) จากการประเมินค่าภูมิหลังของการสะสมตัวของสารหนูในพื้นที่บริเวณที่ราบในตำบลรัตนบุรีทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการทำเหมืองแร่ พบว่า มีสารหนูทั้งหมดสะสมในดิน 15–300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (จันทร์เพ็ญ, 2535) ซึ่งสูงกว่าระดับที่กำหนดในดินทำการเกษตรในประเทศไทย (3.90 mg kg⁻¹) (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2547)

2.3 รูปของสารหนูในดินและวิธีการสกัด

สารหนูในดินมีทั้งรูปที่มีศักยภาพในการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมและสารหนูที่อยู่ในรูปทางธรณีเคมี (geochemical form) การแยกส่วนของสารหนูในดินสามารถทำได้โดยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น (sequential extraction) ด้วยสารเคมีที่มีความรุนแรงเพิ่มขึ้นในแต่ละขั้นตอน โดยสามารถแบ่งสารหนูในดินออกเป็น 5 รูป คือ

2.3.1 สารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจง (non-specifically adsorbed)

สารหนูรูปนี้มีศักยภาพที่จะปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย เป็นสารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจง ถูกดูดซับบนผิวของคอลลอยด์ การดูดซับมักเกิดกับไอออนที่มีโมเลกุลของน้ำล้อมไว้โดยรอบ และเกิดจากแรงดึงดูดแบบคูอมบ์เนื่องจากประจุไฟฟ้าต่างกัน

โดยสารหนูดังกล่าวทำปฏิกิริยาเป็นไอออนเชิงซ้อนที่ผิวชั้นนอก (outer-sphere complex) หรือ แอนไอออนที่อยู่ในชั้นแพร่กระจาย (diffuse layer) สารหนูเหล่านี้จะสามารถแลกเปลี่ยนได้ง่ายกับแอนไอออนอื่น ๆ ในสารละลายรอบนอก (Wenzel *et al.*, 2001; Gleyzes *et al.*, 2002)

วิธีการสกัดสารหนูส่วนนี้นิยมใช้สารแอมโมเนียมซัลเฟต $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ เนื่องจาก SO_4^{2-} มีความสามารถในการดูดซับบนผิวของคอลลอยด์ และ SO_4^{2-} สามารถไปไล่ที่ AsO_3^{3-} และ AsO_4^{3-} ที่เกาะอยู่บนผิวของคอลลอยด์ให้ออกมาอยู่ในสารละลายดินได้

2.3.2 สารหนูที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (specifically adsorbed)

สารหนูส่วนนี้เป็นแหล่งสำรองในดินจะค่อย ๆ ปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมอย่างช้า ๆ เป็นสารหนูที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง ถูกดูดซับที่ผิวชั้นใน (inner-sphere complex) ซึ่งการดูดซับแบบนี้ไม่ได้เกิดตรงตำแหน่งที่มีประจุบวกของคอลลอยด์ ปริมาณแอนไอออนที่ถูกดูดซับไม่จำเป็นต้องมีสมมูลเท่ากับประจุบวกบนผิวคอลลอยด์ การดูดซับแบบเฉพาะเจาะจงมักเกิดกับออกซีแอนไอออน (oxyanion) (AsO_3^{3-} , AsO_4^{3-}) ซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange) ระหว่างแอนไอออนกับหมู่ฟังก์ชันด้วยแรงดูดยึดที่เหนียวแน่นมากยิ่งขึ้นบนผิวของคอลลอยด์ดิน (Wenzel *et al.*, 2001)

วิธีการสกัดสารหนูส่วนนี้นิยมใช้สารแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต $[(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4]$ เนื่องจาก H_2PO_4^- จากปฏิกิริยา ligand exchange ที่ $-\text{OH}$ group ของออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม ทำให้แอนไอออนเจาะทะลุเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างคอลลอยด์ ซึ่ง H_2PO_4^- จะเข้าไปแทนที่ AsO_3^{3-} และ AsO_4^{3-} ที่ดูดซับที่ผิวชั้นในของคอลลอยด์ดินให้ออกมาอยู่ในสารละลายดินได้

2.3.3 สารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์อสัณฐาน (amorphous and poorly-crystalline hydrous oxides of Fe and Al)

สารหนูรูปนี้ไม่สามารถปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย เป็นสารหนูสามารถอยู่ในรูปทางธรณีเคมี (geochemical form) เช่น รูปออกไซด์ที่เสถียร ยากต่อการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม (Sarkar and Datta, 2004) ซึ่งสารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์อสัณฐาน เกิดในสภาวะออกซิเดชันในสภาพแวดล้อมเป็นด่างหรือเป็นกลาง สารประกอบอาร์เซนเตตจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยการตกตะกอนร่วมกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ (Wilson and Hawkins, 1978)

วิธีการสกัดสารหนูส่วนนี้นิยมใช้สารแอมโมเนียมออกซาเลต $[\text{NH}_4\text{-oxalate buffer}]$

2.3.4 สารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผลึก (well-crystallized hydrous oxides of Fe and Al)

สารหนูรูปนี้ไม่สามารถปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายหรือปลดปล่อยออกมาน้อยมาก (Sarkar and Datta, 2004) เป็นสารหนูส่วนที่ตรงกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์โดยถูกยึดไว้ด้วยแรงที่เหนียวแน่น เมื่อเวลาผ่านไปจะเปลี่ยนไปเป็นสารมีผลึก (Wang *et al.*, 2015; Lock *et al.*, 2018)

วิธีการสกัดสารหนูส่วนนี้นิยมใช้สารแอมโมเนียมออกซาลेट และกรดแอสคอร์บิก [NH₄ – oxalate buffer + ascorbic acid]

2.3.5 สารหนูส่วนที่เหลือ (residual phases)

สารหนูรูปนี้ไม่สามารถปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ เป็นสารหนูส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในแร่ซัลไฟด์และแร่อลูมิโนซิลิเกตยากต่อการสกัด (Kim *et al.*, 2014)

วิธีการสกัดสารหนูส่วนนี้นิยมใช้กรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริก [HNO₃ + HCl]

จากรายงานการศึกษาสารหนูรูปต่างๆ ดังกล่าวในดินบริเวณสามเหลี่ยมปากแม่น้ำแดง ประเทศเวียดนาม พบว่า สารหนูส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผลึก เท่ากับ 37.23 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ สารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์อสัณฐาน เท่ากับ 30.99 เปอร์เซ็นต์ (สารหนู 2 รูปนี้ไม่สามารถปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย) ถัดมา คือ สารหนูส่วนที่เหลือ เท่ากับ 24.65 เปอร์เซ็นต์ สารหนูรูปที่พบน้อย คือ สารหนูที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง เท่ากับ 7.03 เปอร์เซ็นต์ และสารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจง เท่ากับ 0.09 เปอร์เซ็นต์ (สารหนู 2 รูปนี้มีศักยภาพที่จะปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม) (Hoang and Hahn, 2015) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยอื่น ๆ เช่น ดินที่มีการปนเปื้อนสารหนูในออสเตรเลีย พบว่า สารหนูรูปที่พบมากที่สุด คือ สารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์อสัณฐาน เท่ากับ 42.30 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ สารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผลึก เท่ากับ 29.20 เปอร์เซ็นต์ ถัดมา คือ สารหนูส่วนที่เหลือ เท่ากับ 17.50 เปอร์เซ็นต์ สารหนูรูปที่พบน้อย คือ สารหนูที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง เท่ากับ 9.50 เปอร์เซ็นต์ และสารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจง เท่ากับ 0.24 เปอร์เซ็นต์ (Wenzel *et al.*, 2001) และจากรายงานการศึกษาดินบริเวณอดีตพื้นที่ทำเหมือง Barruecopardo ในหมู่บ้านทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ จังหวัดซาลามันกา ราชอาณาจักรสเปน พบว่า สารหนูรูปที่พบมากที่สุด คือ สารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์อสัณฐาน เท่ากับ 15.10–53.20 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ สารหนูส่วนที่เหลือ เท่ากับ 12.90–43.30 เปอร์เซ็นต์ ถัดมา คือ สารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผลึก เท่ากับ 8.80–34.20 เปอร์เซ็นต์ สารหนูรูปที่พบน้อย คือ สารหนูที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง เท่ากับ

4.90–25.20 เปอร์เซ็นต์ และสารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจง เท่ากับ 0.80–13.90 เปอร์เซ็นต์ (Alvarez–Ayuso *et al.*, 2016) และจากรายงานการศึกษาดินบริเวณอดีตพื้นที่ทำเหมือง Terrubias ในจังหวัดซาลามันกา ราชอาณาจักรสเปน พบว่า สารหนูรูปที่พบมากที่สุดคือ สารหนูส่วนที่เหลือ เท่ากับ 49.30–72.10 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ สารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผลึก เท่ากับ 14.70–35.00 เปอร์เซ็นต์ ถัดมา คือ สารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์อสัณฐาน เท่ากับ 2.90–17.00 เปอร์เซ็นต์ สารหนูรูปที่พบน้อย คือ สารหนูที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง เท่ากับ 1.40–8.00 เปอร์เซ็นต์ และสารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจง เท่ากับ <0.2 เปอร์เซ็นต์ (Otones *et al.*, 2011) จากรายงานการศึกษาปริมาณสารหนูรูปดังกล่าวข้างต้น โดยเฉพาะสารหนูในรูปที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจงและสารหนูที่ดูดซับแบบเฉพาะเจาะจงจะพบในปริมาณน้อยแต่เป็นสารหนูรูปที่มีศักยภาพที่จะปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมมากกว่าสารหนูรูปอื่น ๆ

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายของสารหนูรูปต่าง ๆ ในดิน

สมบัติของดินเป็นปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลต่อรูปของสารหนูที่จะสะสมและถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม (Redman *et al.*, 2002)

2.4.1 อินทรีย์วัตถุ (organic matter)

อินทรีย์วัตถุในดินมีประจุบวกอยู่บางส่วนทำให้มีความสามารถในการดูดซับแอนไอออนได้ ส่วนประจุบวกดังกล่าวมักเกิดขึ้นจากกระบวนการเติมโปรตอน (protonation) ของ amine group บนอนุภาคอินทรีย์วัตถุซึ่งในสภาวะที่ดินเป็นกรดทำให้เกิดประจุบวกได้ดีจึงส่งผลให้สารหนูจับตัวกับอินทรีย์วัตถุได้ดี (Meharg, 2004)

2.4.2 ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P)

สภาวะเป็นกรดเล็กน้อยพฤติกรรมของสารหนูจะคล้ายกับฟอสเฟต และไอออนทั้งสองจะถูกดูดซับอย่างเหนียวแน่นบนพื้นผิวของดินเหนียวและออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม (O'Neill, 1990 อ้างโดย Alam *et al.*, 2003) ซึ่งการดูดซับของฟอสเฟตเกิดจากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange) ระหว่างออกซิแอนไอออนในสารละลายกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของแร่หรือคอลลอยด์ดิน เช่น แร่เหล็กออกไซด์ การแลกเปลี่ยนลิแกนด์ดังกล่าวมีผลทำให้เกิดการดูดซับแอนไอออนเชิงซ้อนที่ผิวชั้นใน (inner-sphere surface complexes) (Goh and Lim, 2004)

2.4.3 เหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ (iron and aluminum oxide)

สารประกอบอาร์เซนเตตจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยการตกตะกอนร่วมกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ (Wilson and Hawkins, 1978) และอัตราการดูดซับของสารประกอบอาร์ซีนีตของเหล็กในดิน ขึ้นอยู่กับระยะเวลาด้วย (Tang *et al.*, 2007) ทำให้สารหนุรูปที่เกี่ยวข้องเนื่องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผลึกมีความสัมพันธ์กับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ (Krysiak and Karczewska, 2007)

2.4.4 ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนุ

ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนุมีผลต่อระดับสารหนุในดิน จากการรายงานดินที่ปนเปื้อนสารหนุที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนุ <10 เมตร พบสารหนุทั้งหมดสูงกว่าระยะห่าง 10–100 เมตร (Otones *et al.*, 2011) เช่นเดียวกับ Garcia-Sanchez and Alvarez-Ayuso (2003) รายงานว่า ระยะใกล้แหล่งกำเนิดสารหนุ (<10 เมตร) พบสารหนุทั้งหมดในดินสูงกว่าระยะไกล (50–500 เมตร)

2.4.5 ปริมาณสารหนุที่ระดับความลึกต่าง ๆ ของดิน

ดินบน (0–15 cm) พบปนเปื้อนสารหนุทั้งหมด 6,030 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าในดินล่าง (20–30 cm) พบสารหนุทั้งหมด 1,670 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และบางบริเวณพบว่า ดินล่าง (20–30 cm) มีสารหนุทั้งหมด 260 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สูงกว่าดินบน (0–15 cm) พบสารหนุทั้งหมด 190 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Karczewska *et al.*, 2013) เช่นเดียวกับ Otones และคณะ (2011) รายงานว่า ดินบน (0–10 cm) พบปนเปื้อนสารหนุทั้งหมด 2,300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าในดินล่าง (20–30 cm) พบสารหนุทั้งหมด < 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

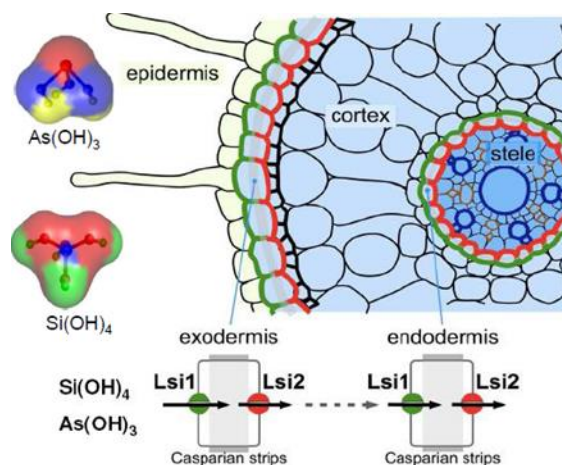
2.5 ความเป็นพิษของสารหนุในพืช

สารหนุไม่ใช่ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่เป็นธาตุที่สามารถทำลายพืชได้ โดยสารหนุจะเข้าไปทำลายเนื้อเยื่อของพืชโดยเฉพาะใบอ่อน ยอดอ่อน หรือลำต้น เนื่องจากสารหนุที่พืชดูดซับเข้าไปผ่านทางรากจะไปรบกวนกระบวนการเมตาบอลิซึมต่าง ๆ ในเซลล์ ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช เช่น สารหนุเข้าไปรบกวนการทำงานของดีเอ็นเอและอาร์เอ็นเอ โดยสารหนุสามารถจับกับหมู่ hydroxyl (–OH) ของฟอสเฟตในกรดนิวคลีอิก ทำให้พันธะ ester ระหว่างหมู่ฟอสเฟตกับหมู่ hydroxyl ของน้ำตาล pentose สามารถสลายได้ง่ายขึ้น (Abedin and Meharg, 2002) และยังสามารถจับกับหมู่ sulfhydryl (–SH) บนสายพอลิเพปไทด์ซึ่งส่งผลต่อการทำงานของโปรตีน นอกจากนี้ยังก่อให้เกิด reactive oxygen species และปฏิกิริยา lipid Peroxidation ที่มีผลเสียต่อเซลล์พืชอีกด้วย (Hartley-Whitaker *et al.*, 2001) ในพืชชั้นสูงชนิดต่าง ๆ สารหนุที่เข้าสู่เซลล์พืชยังมีผลต่อการยับยั้ง

ไกลโคไลซิส (glycolysis) และการสังเคราะห์ ATP (oxidative phosphorylation) ในกระบวนการหายใจระดับเซลล์ (Hindmarsh, 2000) จากรายงานการสะสมสารหนูในพืช เช่น ผักกูดมีการสะสมสารหนูไว้ในส่วนของใบมากกว่าราก ปริมาณของสารหนูสะสมในใบสูงถึง 1,373 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งของพืช ทำให้ผักกูดแสดงอาการเป็นพิษของสารหนู คือ การเจริญเติบโตลดลง ใบเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและหงิกงอ ยอดอ่อนแห้งตาย รากเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและหยุดการเจริญเติบโต (หัทธยา, 2547) นอกจากนี้ต้นกล้ามะนาวแสดงอาการใบเหี่ยว เกิดจุดไหม้บนใบแล้วค่อยแผ่ขยายไปทั่วทั้งใบ เมื่อต้นกล้ามะนาวได้รับสารหนูเพียง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และต้นกล้ามะนาวตายเมื่อได้รับสารหนู 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (Liebig *et al.*, 1959 อ้างโดย สุวรรณี, 2537) เมื่อปลูกข้าวในระดับความเข้มข้นของสารหนู (20 และ 40 mg kg⁻¹) พบว่าอาการเป็นพิษของสารหนูในต้นกล้าข้าวแสดงที่ใบล่างโดยปลายใบมีสีแดงและเริ่มมีสีเหลืองและขยายไปสู่เส้นกลางใบ หลังจากนั้นใบข้าวหงิกงอและแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนูสูง (60 และ 80 mg kg⁻¹) พบว่า ต้นข้าวใกล้ตายและแคระแกร็น (Te, 2017)

2.5.1 การรับและลำเลียงสารหนูเข้าสู่ต้นข้าว

สารหนูที่พบในข้าวโดยส่วนใหญ่มักพบในรูปของอินทรีย์สาร ได้แก่ อาร์เซนเนตและอาร์เซไนต์ นอกจากนี้ยังสามารถพบได้ในรูปของอินทรีย์สาร ได้แก่ กรดไดเมทิลอาร์ซีนิกและกรดโมโนเมทิลอาร์ซีนิก ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่าสารหนูอนินทรีย์ (Williams *et al.*, 2005) ในสภาวะที่ดินมีน้ำท่วมขังหรือในสภาวะที่ขาดออกซิเจน (anaerobic environment) สารหนูมักอยู่ในรูป reduced form หรืออาร์เซไนต์ (Xu *et al.*, 2008) พบว่า อาร์เซไนต์จะเข้าสู่เซลล์รากของข้าวโดยใช้ช่องทางเดียวกับซิลิกอน (Si) ผ่านทางโปรตีน ประเภท aquaglyceroporins ที่เรียกว่า nodulin26-like intrinsic protein (NIPs) หรือ silicon influx transporter (Isi1) และอาร์เซไนต์ที่เข้าสู่เซลล์จะเข้าสู่ท่อลำเลียงน้ำผ่านทาง Si efflux transporter (Isi2) (Ma *et al.*, 2008) เมื่อรับอาร์เซไนต์เข้าสู่เซลล์ชั้นนอก (exodermis) อาร์เซไนต์จะถูกส่งต่อไปยัง Isi1 และ Isi2 ของเซลล์ชั้นใน (endodermis) ที่ทำหน้าที่ส่งผ่านอาร์เซไนต์เข้าไปยัง xylem ด้วย Isi2 จากนั้นอาร์เซไนต์จะถูกส่งต่อไปยังยอด และสะสมในเมล็ดข้าวในที่สุด (ภาพที่ 1.1) (Zhao *et al.*, 2008) นอกจากนี้ Isi1 และ Isi2 จะเป็นทางผ่านของอาร์เซไนต์แล้ว ยังเป็นช่องทางในการรับสารหนูในรูปกรดไดเมทิลอาร์ซีนิกและกรดโมโนเมทิลอาร์ซีนิกอีกด้วย (Li *et al.*, 2009)



ภาพที่ 1.1 การรับและลำเลียงอาร์เซนไนด์เข้าสู่ต้นข้าว (Zhao *et al.*, 2008)

ในดินปกติที่ไม่มีน้ำท่วมขังหรือในสภาวะที่มีออกซิเจน (aerobic environment) มักพบสารหนูในรูปของอาร์เซนเตต (Meharg, 1994) อาร์เซนเตตสามารถเข้าสู่เซลล์รากโดยช่องทางเดียวกับฟอสเฟต เนื่องจากสารทั้งสองชนิดมีโครงสร้างคล้ายกัน (analogue) จากการศึกษาในข้าว พบว่า อาร์เซนเตตสามารถเข้าสู่เซลล์รากผ่านทาง phosphate transporter โดยฟอสเฟตที่อยู่ในดินช่วยในการลดอาร์เซนเตตที่เข้าสู่เซลล์พืช (Zhao *et al.*, 2008) อาร์เซนเตตที่เข้าสู่เซลล์ผ่านทาง phosphate transporter จะถูกรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปของอาร์เซนไนด์โดยเอนไซม์ arsenate reductase และมี glutathione ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Ghosh *et al.*, 1999) หลังจากนั้นสารหนูอาร์เซนไนด์ทั้งที่มาจากการเปลี่ยนรูปของอาร์เซนเตตและการรับเข้าสู่เซลล์ผ่านทาง Lsi1 จะถูกพาเข้าสู่แวคิวโอลเพื่อลดความเป็นพิษในเซลล์ โดยโปรตีน phytochelatins ที่ถูกสังเคราะห์มาจากเอนไซม์ phytochelatins synthase และมี glutathione ทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้น (Wargar *et al.*, 2009) อาร์เซนไนด์จะเข้าจับบริเวณหมู่ sulfhydryl (-SH) ของโปรตีน phytochelatins เป็นองค์ประกอบรวมซับซ้อนซึ่งมีหลายรูปแบบก่อนที่จะถูกส่งเข้าสู่แวคิวโอล ได้แก่ As(III)-PC2, As(III)-PC3, และ GSH-As(III)-PC2 เป็นต้น (Raab *et al.*, 2007) ปริมาณสารหนูในข้าวที่พบมากที่สุด คือ บริเวณราก ลำต้น ใบ เปลือก และเมล็ด ตามลำดับ (Liu *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2008) สารหนูสามารถพบกระจายได้ทั่วไปตามส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าว Abedin และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาปริมาณสารหนูในส่วนต่างๆ ของต้นข้าวที่ปลูกในบังกลาเทศ พบว่า มีการสะสมสารหนูมากที่สุดในราก ลำต้น เปลือก และเมล็ด ตามลำดับ เมื่อให้สารหนูที่ความเข้มข้นต่ำ (0.1 mg L^{-1}) พบว่า มีสารหนูสะสมอยู่ในราก ลำต้น เปลือก และเมล็ด เท่ากับ 18.6, 3.9, 0.7 และ $0.24 \text{ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม}$ ตามลำดับ และเมื่อให้สารหนูที่ความเข้มข้นสูงขึ้น (8 mg L^{-1}) พบว่า มีการสะสมสารหนูในราก ลำต้น เปลือก และเมล็ดข้าวปริมาณสูงขึ้น เท่ากับ 107.5, 91.8, 2.82 และ $0.42 \text{ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม}$ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า สารหนูมีการเคลื่อนที่ขึ้นสู่ยอด และสะสมอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ

Rahmana และคณะ (2007) ที่ได้ศึกษาปริมาณสารหนูในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวที่ปลูกในบังกลาเทศเช่นเดียวกัน พบว่า มีสารหนูสะสมมากที่สุดในส่วนของลำต้น เปลือก และเมล็ด เท่ากับ 20.6, 1.6 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สารหนูที่พบมากจะอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ ได้แก่ อาร์เซเนตและอาร์เซไนต์ สำหรับสารหนูอินทรีย์จะพบในปริมาณน้อยมาก มีรายงานว่า ในระบบพืชไร้ดิน (hydroponics) ยังคงพบสารหนูในรูปกรดไดเมทิลอาร์ซีนิกและกรดโมโนเมทิลอาร์ซีนิก แต่พบในปริมาณน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ของสารหนูทั้งหมด (Quaghebeur and Rengel, 2003; Xu *et al.*, 2007)

2.5.2 สารหนูในเมล็ดข้าว

ข้าวเป็นพืชที่มีโอกาสได้รับสารหนูสูงที่สุด (Williams *et al.*, 2007) เนื่องจากข้าวเป็นพืชที่ต้องการน้ำหล่อเลี้ยงในระหว่างการเจริญเติบโต จำเป็นต้องปลูกในพื้นที่ราบลุ่ม และมีน้ำขัง ส่งผลให้ข้าวมีโอกาสได้รับสารหนูสูงกว่าพืชชนิดอื่น ๆ จากการรายงานดินที่มีน้ำท่วมขัง มีปริมาณการสะสมของสารหนูมากกว่าในดินปกติ 7–16 เท่า นอกจากนี้ยัง พบว่า ข้าวที่ปลูกในดินที่มีน้ำขัง มีสารหนูสะสมอยู่ในยอดและเมล็ดข้าว สูงกว่าการปลูกในดินปกติ 2.6–2.9 เท่า และมีผลต่อการสะสมของสารหนูในเมล็ดข้าว (Xu *et al.*, 2008) จากรายงานพบว่า ข้าวที่ปลูกในสาธารณรัฐประชาชนบังกลาเทศมีสารหนูสะสมในเมล็ดข้าวสูงถึง 1.85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (0.05–1.85 mg As kg⁻¹) (Meharg and Rahman, 2003) และในประเทศอื่น ๆ ที่พบสารหนูสะสมในเมล็ดข้าว เช่น สาธารณรัฐประชาชนจีน (0.46–1.18 mg As kg⁻¹) (Sun *et al.*, 2008) ประเทศญี่ปุ่น (0.07–0.42 mg As kg⁻¹) (Meharg *et al.*, 2009) ประเทศเกาหลี (0.24–0.72 mg As kg⁻¹) (Lee *et al.*, 2008) รัฐเบงกอลตะวันตกของอินเดีย (0.085–0.66 mg As kg⁻¹) (Roychowdhury *et al.*, 2002) ประเทศฝรั่งเศส (0.12–0.61 mg As kg⁻¹) ประเทศสหรัฐอเมริกา (0.16–0.71 mg As kg⁻¹) (Zavala *et al.*, 2008) สหภาพยุโรป ราชอาณาจักรสเปน และสาธารณรัฐอิตาลี (0.13–20, 0.07–0.21 และ 0.19–0.22 mg As kg⁻¹ ตามลำดับ) (Williams *et al.*, 2005) สาธารณรัฐกานา (0.01–0.15 mg As kg⁻¹) (Williams *et al.*, 2006) สาธารณรัฐสังคมนิยมเวียดนาม (0.09–0.17 mg As kg⁻¹) (Adomako *et al.*, 2011) สาธารณรัฐอิสลามปากีสถาน (0.0–0.2 mg As kg⁻¹) (Adomako *et al.*, 2011) ประเทศที่พบรายงานการสะสมสารหนูในเมล็ดข้าวต่ำ เช่น เครือรัฐออสเตรเลีย (0.02–0.04 mg As kg⁻¹) (Williams *et al.*, 2006) ประเทศแคนาดา (0.02 mg As kg⁻¹) (Williams *et al.*, 2005) ประเทศอียิปต์ (0.02–0.08 mg As kg⁻¹) (Meharg *et al.*, 2007) ส่วนประเทศไทยพบการสะสมสารหนูในเมล็ดข้าว 0.06–0.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Adomako *et al.*, 2011) และ 0.01–0.39 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Meharg *et al.*, 2009) ซึ่งประเทศไทยกำหนดสารหนูทั้งหมดในเมล็ดข้าวไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2529)

2.6 การลดความเป็นพิษของสารหนูในดินและพืช

2.6.1 การบำบัดโดยใช้พืช (phytoremediation) อาศัยหลักการดูดซึมสารปนเปื้อนจากดินผ่านเนื้อเยื่อไปสะสมในพืช จากนั้นก็เก็บเกี่ยวและนำไปบำบัดต่อไป เป็นวิธีที่ใช้ต้นทุนต่ำ และยังช่วยป้องกันการพังทลายของดินได้ด้วย เหมาะสำหรับใช้บำบัดในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของสารหนูซึ่งมีความเข้มข้นน้อยและมีการแพร่กระจายอย่างกว้างขวาง โดยรากของพืชที่ใช้ในการบำบัดต้องหยั่งถึงในดินบริเวณที่มีการปนเปื้อน และสารหนูที่ปนเปื้อนในดินต้องมีความสามารถในการละลายดี (ศุภมาศ และคณะ, 2559) จากการรายงานการศึกษาประสิทธิภาพของบอนจีนดำและบอนเขียว (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) ในการบำบัดสารหนู (0, 50, 75, 100, 125 และ 150 mg kg⁻¹) ที่ปนเปื้อนในดิน พบว่า บอนทั้ง 2 ชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในทุกระดับความเข้มข้นของสารหนู และมีการสะสมสารหนูในรากมากที่สุด รองลงมา คือ ลำต้นใต้ดิน ใบ และก้านใบ ตามลำดับ ซึ่งบอนทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในดินได้ใกล้เคียงกัน (Jampanil, 2000) นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาการสะสมสารหนูด้วยพืช *Rubus ulmifolius* ที่ปลูกในบริเวณดินที่มีการปนเปื้อนสารหนู 3,078 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า *R. ulmifolius* มีความสามารถในการสะสมสารหนูในราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 277–1,721, 30–133 และ 60–265 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Marques *et al.*, 2009)

2.6.2 เพิ่มค่าศักยภาพรีดอกซ์ การเพิ่มสภาพออกซิเดชันในดินสามารถลดระดับสภาพละลายได้ของสารหนู เนื่องจากสารประกอบอาร์ซีเนตจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยการตกตะกอนร่วมกับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม (Wilson and Hawkins, 1978) เช่นดินที่ปลูกข้าวมีน้ำขังอยู่ในสภาพออกซิไดส์สามารถลดปริมาณสารหนูในส่วนที่พืชสามารถดูดกินขึ้นไปได้ (Kitagishi and Yamane, 1981)

2.6.3 การใส่สารตกตะกอนกับสารหนู จากการศึกษาในปัจจุบัน พบว่าการทำให้สารหนูตกตะกอนกับสารประกอบเหล็กออกไซด์ FeO_x จะช่วยให้สารหนูถูกดูดจับในดินและมีความเสถียรไม่ละลายออกมาได้ง่าย (Kumpiene *et al.*, 2008) ซึ่งจากการรายงานพบว่า ทั้งในรูปแบบแร่ เช่น Goethite หรือสารประกอบของเหล็กที่พองสลายตัวได้น้อย เช่น Fe-bearing materials สามารถลดสารหนูในพืชได้ การดูดใช้สารหนูในพืชจะสัมพันธ์อย่างมากกับปริมาณสารหนูในดิน ทั้งในส่วนของปริมาณทั้งหมดและที่อยู่ในสารละลาย ทำให้สันนิษฐานได้ว่าพืชดูดใช้สารหนูด้วยกระบวนการที่สารหนูถูกดูดใช้ไปกับการไหลของน้ำ การใส่วัสดุที่ทำให้เกิดการตกตะกอนของสารหนู เช่น เฟอร์ริสซัลเฟต แคลเซียมคาร์บอเนต ลงในดินที่มีสารหนู

ที่ละลายได้น้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (สกัดด้วย 0.05 M HCl) สามารถลดปริมาณสารหนูในสารละลายได้ (Hanada *et al.*, 1975)

2.6.4 การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตสามารถช่วยลดสารหนูส่วนที่พืชดูดใช้ได้ เนื่องจากอาร์เซนเดมีโครงสร้างคล้ายกันกับฟอสเฟตจึงสามารถผ่านชั้นเยื่อหุ้มเซลล์ของรากได้ แต่ฟอสเฟตมีประสิทธิภาพในการแข่งขันเคลื่อนย้ายดีกว่า (Meharg *et al.*, 1994) ทำให้ฟอสเฟตที่อยู่ในดินช่วยในลดอาร์เซนเดมีที่เข้าสู่เซลล์พืช (Zhao *et al.*, 2008) แต่จากงานรายงานศึกษาบางส่วน พบว่า ฟอสเฟตสามารถไล่ที่สารหนูที่ถูกดูดซับจากสารประกอบต่าง ๆ ของดินได้ จึงสามารถเพิ่มปริมาณสารหนูในดิน เนื่องจากสารหนูในรูปแอนไอออน เช่น AsO_4^{3-} จะถูกดูดซับโดยไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม อาจถูกแทนที่ได้ด้วยฟอสเฟต โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนแอนไอออน (anion exchange) (ศุภมาศ และคณะ, 2559) ส่งผลให้สารหนูในส่วนที่พืชดูดใช้ได้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้ปุ๋ยอินทรีย์ฟอสฟอรัสช่วยลดความเป็นพิษของสารหนูในข้าวสาลีที่ทดลองในกระถางและลดการเคลื่อนย้ายสารหนูจากรากสู่เมล็ด (Pigna *et al.*, 2009) นอกจากนี้ฟอสเฟตสามารถลดหรือเพิ่มการดูดใช้สารหนูในพืช ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปของสารหนูและชนิดของพืช (Otte *et al.*, 1990) เช่น การสะสมของสารหนูในข้าวจะแตกต่างกันในแต่ละสายพันธุ์ เช่น ข้าวพันธุ์ Iratom 24 มีสารหนูในเมล็ดข้าว ($0-0.14 \text{ mg kg}^{-1}$) สูงกว่าข้าวสายพันธุ์ BRR1 dhan 28 ($0-0.07 \text{ mg kg}^{-1}$) ในขณะที่เดียวกันเมื่อปริมาณสารหนูสูง (20 mg L^{-1}) ส่งผลให้ความสูงของต้นข้าว จำนวนกอ และน้ำหนักเมล็ดข้าวต่อกระถางลดลง (Delowar *et al.*, 2005) ความเข้มข้นของสารหนูในเมล็ดเพิ่มขึ้นเมื่อปลูกข้าวในดินที่ปนเปื้อนสารหนูสูง จากรายงานในดินปลูกข้าวในสาธารณรัฐประชาชนบังกลาเทศ มีสารหนู 20 ไมโครกรัมต่อกกรัม พบว่า มีความเข้มข้นของสารหนูในเมล็ดข้าวสูงกว่า 1.70 ไมโครกรัมต่อกกรัม (Meharg and Rahman, 2003) ความเข้มข้นของสารหนูในราก ต่อซัง แกลบ และเมล็ดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อสารหนูในดินสูงขึ้น แต่ในขณะที่เดียวกันความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในต่อซัง แกลบ และเมล็ดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารหนูที่สูงขึ้นด้วย (Rauf *et al.*, 2011)

2.7 ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 (Suphan Buri 1)

ข้าวสุพรรณบุรี 1 เป็นข้าวเจ้าที่เกิดจากการผสมพันธุ์ระหว่างลูกผสมชั่วที่ 1 ของ IR27316-96-3-2-3 / กข23 // IR27316-96-3-2-3 และลูกผสมชั่วที่ 1 ของ SPRLR77205-3-2-1-1 / SPRLR79134-51-2-2 ที่สถานีทดลองข้าวสุพรรณบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2528 ปลูกคัดเลือกจนได้สายพันธุ์ SPRLR85163-5-1-1-2 เป็นข้าวไม่ไวต่อช่วงแสงปลูกได้ทุกภาคในเขตชลประทาน มีความสูงประมาณ 125 เซนติเมตร อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 120 วัน (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2557) ลักษณะทรงกอตั้ง จำนวน 3-10 ต้นต่อกอ (พัคตร์เพ็ญ และคณะ, 2559) ต้นแข็งไม่ล้มง่าย ใบสีเขียวเข้ม มีขน กาบใบและปล้องสีเขียว ใบธงยาวค่อนข้างตั้งตรง คอรวงยาว รวงค่อนข้าง

แน่น สำหรับเมล็ดข้าวเปลือกมีสีฟาง ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 22 วัน ข้าวสุพรรณบุรี 1 จัดเป็นข้าวเมล็ดยาว โดยเมล็ดข้าวเปลือกมีขนาด (ยาวxกว้างxหนา) 10.0x2.4x2.2 มิลลิเมตร และเมล็ดข้าวกล้องมีขนาด 7.3x2.2x1.8 มิลลิเมตร ปริมาณอมิโลส 29เปอร์เซ็นต์ คุณภาพข้าวสุก ร่วน แข็ง ผลผลิตเมล็ดข้าวสูงประมาณ 806 กิโลกรัมต่อไร่ ข้าวมีการตอบสนองต่อการใช้ปุ๋ย ต้านทานโรคไหม้ โรคขอบใบแห้ง ต้านทานโรคใบหงิก และโรคใบสีส้ม ต้านทานเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล และเพลี้ยกระโดดหลังขาว แต่อาจพบโรคใบขีดสีน้ำตาลในระยะออกรวง ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคเมล็ดต่างได้ (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2557) นอกจากนี้ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 เป็นข้าวที่ต้านทานต่อความเป็นพิษของสารหนูได้ถึง 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Te, 2017)

3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 3.1 ศึกษาสถานะสารหนู สมบัติของดิน และระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนู ต่อรูปของสารหนูในดินที่ปนเปื้อนสารหนู จากอำเภอรอนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช
- 3.2 ศึกษาผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโต การดูดใช้สารหนู และธาตุอาหารในข้าวที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสารหนู

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 4.1 ทราบสถานะสารหนูและปัจจัยที่มีผลต่อรูปของสารหนู เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการดินที่ปนเปื้อนสารหนู จากอำเภอรอนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช
- 4.2 ทราบถึงผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโต การดูดใช้สารหนู และธาตุอาหารอื่น ๆ ของข้าวที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนสารหนู เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับนำไปทดลองในสภาพพื้นที่จริง

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน และทดลองในกระถาง

- 1.1 กระถางทดลองพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านบนยาว 25.4 เซนติเมตร ด้านฐานยาว 17 เซนติเมตร และสูง 22 เซนติเมตร
- 1.2 โกร่งบดดินและตะแกรงร่อนดินขนาด 2 มิลลิเมตร (10 mesh)
- 1.3 แผนที่ดินของกรมพัฒนาที่ดิน (กรมแผนที่ทหาร, 2542)
- 1.4 เมล็ดข้าว (พันธุ์สุพรรณบุรี 1)
- 1.5 สว่านเจาะดิน (auger)

2. อุปกรณ์และเครื่องมือวิทยาศาสตร์

- 2.1 กระจกทรงวงวัดต์แมน เบอร์ 1 และ 5
- 2.2 เครื่องกลั่นไนโตรเจน (nitrogen distillation apparatus)
- 2.3 เครื่องแก้วและอุปกรณ์ตวงวัดชนิดต่างๆ (adjustable pipette, measuring pipette, glass beaker, measuring cylinder, erlenmeyer flask, test tube, kjedal tube, plastic centrifuge tube, volumetric flask , volumetric pipette, titration set and plastic bottle)
- 2.4 เครื่องกวนความเร็วสูง (high-speed stirrer)
- 2.5 เครื่องเขย่า (shaker)
- 2.6 เครื่องเขย่าผสมสารละลาย (vortex mixer)
- 2.7 เครื่องชั่งความละเอียด 0.01 กรัม และ 0.0001 กรัม
- 2.8 เครื่องดูดจ่ายสารละลาย (dispenser)
- 2.9 เครื่องบดตัวอย่างพืช (grinder)
- 2.10 เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- 2.11 เครื่องวิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (visible spectrophotometer)
- 2.12 เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge)
- 2.13 เครื่องให้ความร้อนหลอดทดลอง (heating block)
- 2.14 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (atomic absorption spectrophotometer: AAS)

- 2.15 เครื่องอินดักทีฟพลาสมาออปติคอลอิมิสชันสเปกโทรมิเมตรี
(Inductively couple plasma optical emission spectrometry)
- 2.16 เครื่องอิเล็กทรอนิกส์คอนดักทีวิตีมิเตอร์ (electrical conductivity meter)
- 2.17 ตู้ดูดควัน (Fume hood)
- 2.18 ตู้อบตัวอย่างดิน (hot air oven)
- 2.19 เตาย่อยตัวอย่าง (digestion block)
- 2.20 เตาให้ความร้อน (hot plate)
- 2.21 โถดูดความชื้น (desiccator)
- 2.22 ปิเปตอัตโนมัติ (automatic pipette)
- 2.23 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath)

3. สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ตัวอย่างดินและพืช

- 3.1 กรดซัลฟิวริก (sulphuric acid: 98% w/w H_2SO_4)
- 3.2 กรดไนตริก (nitric acid: 65% w/w HNO_3)
- 3.3 กรดบอริก (boric acid: H_3BO_3)
- 3.4 กรดเพอร์คลอริก (perchloric acid: 70% w/w $HClO_4$)
- 3.5 กรดอะซิติก (glacial acetic acid: 99.5 % CH_3COOH)
- 3.6 กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid: $C_6H_8O_6$)
- 3.7 กรดออกซาลิก (oxalic acid: $(COOH)_2 \cdot 2H_2O$)
- 3.8 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid: HCl)
- 3.9 แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต (calcium chloride di hydrate: $CaCl_2 \cdot 2H_2O$)
- 3.10 คอปเปอร์ซัลเฟต (copper sulfate: $CuSO_4$)
- 3.11 ซีลีเนียม (selenium: Se)
- 3.12 โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate: Na_2CO_3)
- 3.13 โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride: $NaCl$)
- 3.14 โซเดียมซิเตรต (sodium citrate: $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$)
- 3.15 โซเดียมไดไธไอนด์ (sodium dithionite: $Na_2S_2O_4$)
- 3.16 โซเดียมไบคาร์บอเนต (sodium bicarbonate: $NaHCO_3$)
- 3.17 โซเดียมอะซิเตต (sodium Acetate: CH_3COONa)
- 3.18 โซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต (sodium hexametaphosphate: $(NaPO_3)_6$)
- 3.19 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide: $NaOH$) (เกรดการค้า)
- 3.20 ไดโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซเนตแฮปตาไฮเดรต (disodium hydrogen arsenate hepta hydrate: $Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$)

- 3.21 ไตเอซิลีนไทรเอมีนเพนทาอะซีติกแอซิด (diethylenetriaminepentaacetic acid: $C_{14}H_{23}N_3O_{10}$)
- 3.22 ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (triple superphosphate: $(Ca(H_2PO_4)_2)_2$: 0-46-0)
- 3.23 ไทรเอทานอลามีน (triethanolamine: $C_6H_{15}NO_3$)
- 3.24 โพรโมกรีซอลกรีน (bromocresol green: $C_{21}H_{14}Br_4O_5S$)
- 3.25 โพแทสเซียมคลอไรด์ (potassium chloride: KCl: 0-0-60)
- 3.26 โพแทสเซียมซัลเฟต (potassium sulfate: K_2SO_4)
- 3.27 โพแทสเซียมไดโครเมต (potassium dicromate: $K_2Cr_2O_7$)
- 3.28 เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซาไฮเดรต (ferrous ammonium sulfate hexahydrate: $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$)
- 3.29 เฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ (ferroin indicator)
- 3.30 เมทิลเรด (methyl red: $C_{15}H_{15}N_3O_2$)
- 3.31 แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide: MgO)
- 3.32 ยูเรีย (urea: $CO(NH_2)_2$: 46-0-0)
- 3.33 สารละลายมาตรฐานแคลเซียม (standard calcium: $1,000 \text{ mg L}^{-1}$)
- 3.34 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม (standard potassium: $1,000 \text{ mg L}^{-1}$)
- 3.35 สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส (standard phosphorus: $1,000 \text{ mg L}^{-1}$)
- 3.36 สารละลายมาตรฐานแมกนีเซียม (standard magnesium: $1,000 \text{ mg L}^{-1}$)
- 3.37 สารละลายมาตรฐานสังกะสี (standard zinc: $1,000 \text{ mg L}^{-1}$)
- 3.38 สารละลายมาตรฐานสารหนู (standard arsenic: $1,000 \text{ mg L}^{-1}$)
- 3.39 สารละลายมาตรฐานเหล็ก (standard iron: $1,000 \text{ mg L}^{-1}$)
- 3.40 สารละลายเอทานอล (ethanol: 80% w/w C_2H_5OH)
- 3.41 สตรอนเทียมคลอไรด์ (strontium chloride: $SrCl_2 \cdot 6H_2O$)
- 3.42 อะซิโตน (Acetone: CH_3COCH_3)
- 3.43 แอนติโมนีโพแทสเซียมทาร์เตรต (antimony potassium tartrate: $KSbO \cdot C_4H_4O_6$)
- 3.44 แอมโมเนียมซัลเฟต (ammonium sulfate: $(NH_4)_2SO_4$)
- 3.45 แอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (ammonium dihydrogen phosphate: $NH_4H_2PO_4$)
- 3.46 แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (ammonium fluoride: NH_4F)
- 3.47 แอมโมเนียมเมทาวานาเดต (ammonium metavanadate: NH_4VO_3)
- 3.48 แอมโมเนียมโมลิบเดต (ammonium molybdate: $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$)
- 3.49 แอมโมเนียมอะซิเตต (ammonium acetate: NH_4OAc)
- 3.50 แอมโมเนียมออกซาเลต (ammonium oxalate: $(NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O$)

3.51 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide: NH_4OH)

3.52 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide: 50% w/w H_2O_2 , 30% w/w H_2O_2)

4. วิธีการทดลอง

การศึกษานี้ ประกอบด้วย 2 การทดลอง ดังนี้

4.1 สถานะสารหนูและสมบัติของดินที่ปนเปื้อนสารหนูจากอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช

ศึกษาสถานะสารหนูและสมบัติของดินที่ปนเปื้อนสารหนู โดยทำการเก็บดินเพื่อวิเคราะห์สมบัติทั่วไปของดินและสารหนูรูปต่าง ๆ ในดิน หลังจากนั้น นำข้อมูลมาประมาณค่าแบบช่วง ตลอดจนศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสารหนูรูปต่าง ๆ ในดินกับสมบัติของดินที่ปนเปื้อนสารหนู ตามวิธีการดังนี้

4.1.1 การเก็บและวิเคราะห์สมบัติของดิน

การศึกษานี้ได้เก็บตัวอย่างดินบนและล่างที่มีการปนเปื้อนสารหนู โดยทำการแจกแจงชั้นดินบนและล่างตามชั้นกำเนิดดิน จำนวน 23 บริเวณ (ภาพที่ 2.1) บริเวณละ 3 ซ้ำ เก็บภายในความลึก 100 เซนติเมตร ที่ระยะห่างจากจุดกำเนิดสารหนู 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 และ 6.0 กิโลเมตร ในอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยยึดสายน้ำที่ไหลจากแหล่งกำเนิดสารหนูเป็นหลัก นำดินทั้ง 3 ซ้ำผสมคลุกเคล้าให้เข้ากัน รวมดินบนทั้งหมด 23 ตัวอย่าง และดินล่างทั้งหมด 71 ตัวอย่าง นำดินมาผึ่งลมให้แห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดช่องเปิด 2 มิลลิเมตร เพื่อวิเคราะห์สมบัติของดิน ได้แก่ ค่าความเป็นกรดเป็นด่างและค่าการนำไฟฟ้า (ดิน:น้ำ=1:5) อินทรีย์วัตถุ (Walkley and Black) ไนโตรเจนทั้งหมด (Kjeldahl) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Bray II) โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่สกัดได้ ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (1 M NH_4OAc pH 7) (จำเป็น และ จักรกฤษณ์, 2557) เหล็กออกไซด์อิสระ (0.2 M NH_4^+ -oxalate pH 3) (Schwertmann, 1973) เหล็กออกไซด์ที่เป็นผลึก (Na-citrate-bicarbonate-dithionite) (Mehra and Jackson, 2013) ร้อยละอนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว (pipette method) (Day, 1965)

4.1.2 การสกัดและวิเคราะห์สารหนู

ทำการสกัดและวิเคราะห์รูปของสารหนูด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น (sequential extraction) ตามวิธีของ Lynch (1999) และ Wenzel และคณะ (2001) ซึ่งสกัดสารหนูออกเป็น 5 รูป (ตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 การวิเคราะห์รูปของสารหนูด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น

รูปของสารหนู	สารสกัด
สารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจง (non-specifically adsorbed) (F1)	0.05 M $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
สารหนูที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (specifically adsorbed) (F2)	0.05 M $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$
สารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์อสัณฐาน (amorphous and poorly-crystalline hydrous oxides of Fe and Al) (F3)	0.2 M NH_4 -oxalate buffer ที่ pH 3.25
สารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผลึก (well-crystallized hydrous oxides of Fe and Al) (F4)	0.2 M NH_4 -oxalate buffer+ 0.1 M ascorbic acid ที่ pH 3.25
สารหนูส่วนที่เหลือ (residual phases) (F5) และสารหนูทั้งหมด	$(\text{HNO}_3/\text{HCl})$



ภาพที่ 2.1 จุดเก็บตัวอย่างดินบริเวณที่ศึกษาในอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช

4.1.3 การวิเคราะห์สถิติ

นำข้อมูลดินบน (23 ตัวอย่าง) และ (ดินล่าง 71 ตัวอย่าง) ไปประมาณค่าแบบ ช่วงที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (บุญธรรม, 2553)

โดยใช้สูตร $\bar{X} \pm Z_{\alpha/2} SD/\sqrt{n}$ เมื่อ \bar{X} : ค่าเฉลี่ยของข้อมูล
 Z : ค่าพื้นที่ที่ได้จากตารางโค้งปกติมาตรฐาน
 α : ระดับนัยสำคัญในที่นี้ใช้ที่ 0.05
 SD : ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 n : จำนวนข้อมูล

วิเคราะห์สหสัมพันธ์ด้วย Pearson's correlation ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ประกายรัตน์, 2548)

4.2 ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตลดความเป็นพิษของสารหนูในข้าว พันธุ์สุพรรณบุรี 1

ศึกษาดินที่ปนเปื้อนสารหนูต่อการเจริญเติบโตของข้าว ความเข้มข้นของสารหนูที่สะสมในส่วนต่าง ๆ ของข้าว และการลดความเป็นพิษของสารหนูในข้าวโดยการใช้ทริบเปิล-ซูเปอร์ฟอสเฟต

4.2.1 การเตรียมตัวอย่างดินสำหรับการทดลองและวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน

การศึกษานี้ได้เก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0–15 เซนติเมตร จากผิวดิน ซึ่งจัดเป็นชุดดินโคกเคียน (Ko: Fine-loamy, kaolinitic, isohyperthermic Typic Kandiaquults) จากพื้นที่นาข้าวที่อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช (ภาพที่ 2.1) ที่มีความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดในดิน 10.53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าระดับวิกฤต (3.90 mg kg^{-1}) ของพื้นที่เกษตรกรรมทั้งหมดในประเทศไทย (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2547) จากนั้นนำดินมาผึ่งลมให้แห้ง และแยกดินออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 บดและร่อนดินผ่านตะแกรงช่องเปิดขนาด 2 เซนติเมตร เพื่อนำไปใช้ทำการทดลองปลูกข้าว และส่วนที่ 2 บดและร่อนผ่านตะแกรงช่องเปิดขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินทั่ว ๆ ไป ได้แก่ ค่าความเป็นกรดเป็นด่างและค่าการนำไฟฟ้าของดิน (ดิน:น้ำ=1:5) อินทรีย์วัตถุ (Walkley and Black) ไนโตรเจนทั้งหมด (Kjeldahl) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Bray II) โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่สกัดได้ ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (1 M NH_4OAc pH 7) สังกะสีที่สกัดได้ (DTPA) (จำป็น และจักรกฤษณ์, 2557) และสารหนูทั้งหมด (HNO_3/HCl) (Lynch, 1999)

4.2.2 การเตรียมต้นกล้าข้าว

เมล็ดข้าวที่ได้เตรียมไว้บรรจุในภาชนะ แช่ในน้ำกลั่น ประมาณ 12–24 ชั่วโมง จากนั้นนำเมล็ดขึ้นมาจากน้ำ ใช้ผ้าขาวชุบน้ำจนชุ่มมาห่อหุ้มเมล็ดข้าว รดน้ำทุกเช้าและเย็น เพื่อรักษาความชื้นให้เมล็ดข้าวแตกตุ่มตา ประมาณ 1 มิลลิเมตร จากนั้นโรยเมล็ดข้าวลงในถาด เพาะแล้วรดน้ำปราศจากไออนให้ชุ่ม วางไว้ในที่แสงแดดรำไรจนต้นกล้าแข็งแรง ประมาณ 15–20 วัน ก่อนจะย้ายปลูกลงในกระถางทดลอง (ขวัญหทัย, 2547)

4.2.3 การทดลองในกระถาง

ปลูกข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ในกระถาง ซึ่งทำการทดลองภายใต้เรือนกระจก คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยทำการทดลองซึ่งดิน 6 กิโลกรัม ซึ่งร่อนผ่านตะแกรงช่องเปิดขนาด 2 เซนติเมตร ลงในกระถางทดลองพลาสติกขนาด 25.4×17×22 เซนติเมตร ใส่ปุ๋ยฟอสเฟตในระดับต่าง ๆ ในดินที่มีสารหนูระดับแตกต่างกัน และปลูกต้นกล้าข้าว 5 ต้นต่อกระถาง หลังจากปลูกลงกระถางได้ 7 วัน ถอนต้นกล้าข้าวให้เหลือในกระถาง 3 ต้นต่อกระถาง ซึ่งแยกออกเป็น 3 การทดลองย่อย วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) ดังนี้

การทดลองย่อยที่ 1 และ 2 ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตลดความเป็นพิษของสารหนูในดินที่เติมสารหนู 20 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ทำ 4 ซ้ำ (กระถาง) ประกอบด้วย 5 ตำรับการทดลอง โดยใช้ดินที่มีความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดในดิน 10.53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รวมกับการใส่สารหนูเพิ่มขึ้น (20 และ 10 mg As kg⁻¹) ได้แก่ (1) ตำรับควบคุมที่ไม่ใส่สารหนูแต่ใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 100 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม (P₁₀₀As₀) และ (P₁₀₀As₁₀), (2) ตำรับที่ใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 100 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ร่วมกับสารหนู 20 และ 10 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม (P₁₀₀As₂₀) และ (P₁₀₀As₁₀), (3) ตำรับที่ใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 200 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ร่วมกับสารหนู 20 และ 10 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม (P₂₀₀As₂₀) และ (P₂₀₀As₁₀), (4) ตำรับที่ใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 300 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ร่วมกับสารหนู 20 และ 10 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม (P₃₀₀As₂₀) และ (P₃₀₀As₁₀), (5) ตำรับที่ใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 400 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ร่วมกับสารหนู 20 และ 10 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม (P₄₀₀As₂₀) และ (P₄₀₀As₁₀) ตามลำดับ

การทดลองย่อยที่ 3 ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตลดความเป็นพิษของสารหนูในดินที่มีสารหนูต่ำ (10.53 mg kg⁻¹) ในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1

ทำ 4 ซ้ำ (กระถาง) ประกอบด้วย 4 ตำรับการทดลอง โดยใช้ดินที่มีความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดในดิน 10.53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ได้แก่ (1) ตำรับควบคุมที่ใส่

ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 100 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม (P_{100}), (2) ดำรับที่ใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 200 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม (P_{200}), (3) ดำรับที่ใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 300 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม (P_{300}) และ (4) ดำรับที่ใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 400 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม (P_{400})

โดยสารหนูใส่ในรูปแบบไดโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซเนตแบบห้าไฮเดรต ($Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$) ฟอสฟอรัสใส่ในรูปทริบิเฟอโรสเฟอโรส ($Ca(H_2PO_4)_2$: 0-46-0) ไนโตรเจนใส่ในรูปยูเรีย ($CO(NH_2)_2$: 46-0-0) และโพแทสเซียมใส่ในรูปโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl: 0-0-60) โดยทุกดำรับการทดลองใส่โพแทสเซียมที่ละลายน้ำได้ (K_2O) 100 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม และไนโตรเจนทั้งหมด (Total N) 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งปุ๋ยยูเรียแบ่งใส่ 3 ครั้ง ได้แก่ (1) ก่อนปลูกใส่ 100 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม (2) 30 วัน หลังปลูกใส่ 50 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม และ (3) ระยะสร้างช่อดอกก่อนใส่ 50 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 ระหว่างทดลองรดน้ำปราศจากไอออนเพื่อรักษาความชื้นให้เพียงพอตลอดการทดลอง 4 เดือน

ตารางที่ 2.2 การใส่สารหนูและปุ๋ยในแต่ละดำรับการทดลอง (การทดลองย่อยที่ 1)

Treatment	$Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$	$(Ca(H_2PO_4)_2)$	$CO(NH_2)_2$	KCl
	g pot ⁻¹			
$P_{100}As_0$ (control)	0	1.304	2.608	1.000
$P_{100}As_{20}$	0.499	1.304	2.608	1.000
$P_{200}As_{20}$	0.499	2.608	2.608	1.000
$P_{300}As_{20}$	0.499	3.913	2.608	1.000
$P_{400}As_{20}$	0.499	5.217	2.608	1.000

ตารางที่ 2.3 การใส่สารหนูและปุ๋ยในแต่ละดำรับการทดลอง (การทดลองย่อยที่ 2)

Treatment	$Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$	$(Ca(H_2PO_4)_2)$	$CO(NH_2)_2$	KCl
	g pot ⁻¹			
$P_{100}As_0$ (control)	0	1.304	2.608	1.000
$P_{100}As_{10}$	0.249	1.304	2.608	1.000
$P_{200}As_{10}$	0.249	2.608	2.608	1.000
$P_{300}As_{10}$	0.249	3.913	2.608	1.000
$P_{400}As_{10}$	0.249	5.217	2.608	1.000

ตารางที่ 2.4 การใส่ปุ๋ยในแต่ละตำรับการทดลอง (การทดลองย่อยที่ 3)

Treatment	(Ca(H ₂ PO ₄) ₂)	CO(NH ₂) ₂	KCl
	g pot ⁻¹		
P ₁₀₀ (control)	1.304	2.608	1.000
P ₂₀₀	2.608	2.608	1.000
P ₃₀₀	3.913	2.608	1.000
P ₄₀₀	5.217	2.608	1.000

4.2.4 การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต

เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของข้าวในระยะแตกกอ (30 วัน หลังจากย้ายต้นกล้าลงกระถาง) ระยะสร้างช่อดอกอ่อน (60 วัน หลังจากย้ายต้นกล้าลงกระถาง) ระยะโผล่ช่อดอกและเกสร (75 วัน หลังจากย้ายต้นกล้าลงกระถาง) และระยะเก็บเกี่ยว (120 วัน หลังจากย้ายต้นกล้าลงกระถาง) ได้แก่ ความสูง (วัดโคนต้นถึงปลายยอด) จำนวนกอ โดยเก็บข้อมูลตั้งแต่เริ่มการทดลองได้ 7 วัน หลังจากถอนต้นกล้าข้าวให้เหลือในกระถาง 3 ต้น และเก็บข้อมูลทุกสัปดาห์ จนถึงสิ้นสุดการทดลอง นอกจากนี้ยังเก็บข้อมูลลักษณะอาการเป็นพิษของข้าวที่ได้รับสารหนู

4.2.5 การเก็บตัวอย่างพืชและดินหลังสิ้นสุดการทดลอง (4 เดือน)

เก็บตัวอย่างพืชโดยแยกชิ้นส่วนเมล็ดดี ตอซัง (ลำต้น+ใบ+ก้านช่อดอก) และราก นำมาทำความสะอาด วัดความยาวรวม ชั่งน้ำหนักสด แล้วนำอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อหาน้ำหนักแห้งของแต่ละส่วน แล้วนำไปบดเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุอาหารในพืช (ราก ตอซัง และเมล็ด) ได้แก่ ไนโตรเจน (Kjeldahl) ฟอสฟอรัส โปแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม และสังกะสี (HNO₃:HClO₄; 3:1) (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2557) และสารหนูทั้งหมดในพืช (HNO₃/ H₂O₂) (Lu *et al.*, 2010) การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน ได้แก่ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (ดิน:น้ำ=1:5) ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (ดิน:น้ำ=1:5) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Bray II) สังกะสีสกัดได้ (DTPA) (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2557) และสารหนูทั้งหมด (HNO₃/HCl) (Lynch, 1999)

4.2.6 การวิเคราะห์สถิติ

นำข้อมูลของการเจริญเติบโต ปริมาณธาตุอาหารทั้งในดินและในส่วนต่าง ๆ ของข้าวมาหาค่าเฉลี่ย และนำข้อมูลที่ไต่ไปวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนทางเดียวด้วยวิธี ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างทรีตเมนต์ ด้วยวิธี DMRT (ประกายรัตน์, 2548)

4.3 การวิเคราะห์สมบัติของดิน

4.3.1 ปฏิกริยาดิน (pH) ชั่งดิน 5 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงพลาสติก เติมน้ำที่ปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร (ใช้ดิน:น้ำ อัตราส่วน 1:5) เขย่า แล้ววัดด้วยเครื่อง pH meter

4.3.2 ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (EC) ชั่งดิน 5 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงพลาสติก เติมน้ำที่ปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร (ใช้ดิน:น้ำ อัตราส่วน 1:5) เขย่า แล้ววัดด้วยเครื่อง conductivity meter

4.3.3 อินทรีย์วัตถุ (OM) โดยการวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์คาร์บอนด้วยการออกซิไดซ์อินทรีย์คาร์บอนให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วย $K_2Cr_2O_7$ ในกรดกำมะถันเข้มข้น แล้ววิเคราะห์ไดโครเมตที่เหลือด้วยการไทเทรตกับสารละลาย FAS โดยใช้เฟอร์โรอิน (ferroin) เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วคำนวณปริมาณอินทรีย์วัตถุ โดยหลักการในอินทรีย์วัตถุประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 58

4.3.4 ไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (total nitrogen) โดยวิธีเจลดาล (Kjeldahl method) ย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (98% w/w H_2SO_4) แล้วเติมต่างและนำไปกลั่นหาแอมโมเนียม แล้วนำไปไทเทรตเพื่อหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน

4.3.5 ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P) โดยวิธีเบรย์ทู (Bray II method) ชั่งดิน 1.00 กรัม (ทราบน้ำหนักที่แน่นอน) เติมน้ำยาสกัดเบรย์ทู (0.10 M HCl+0.03 M NH_4F) 10 มิลลิลิตร เขย่า กรอง แล้วทำให้เกิดสีโดยวิธีโมลิบดีนัมบลู นำไปวัดด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer

4.3.6 โปแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K, Ca and Mg) สกัดดินด้วยสารละลาย 1.0 โมลาร์ NH_4OAc pH 7.0 แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของโปแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

4.3.7 ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity; CEC) โดยใช้แอมโมเนียมอะซิเตต (1 M NH_4OAc pH 7) ไล่ที่แคตไอออนที่ดินดูดซับไว้ ล้างแอมโมเนียมส่วนเกินออกด้วยเอธานอล แล้วไล่ที่แอมโมเนียมที่ดินดูดซับไว้โดยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) นำสารละลายไปเติมต่างเพื่อให้แอมโมเนียมเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนีย หลังจากนั้น กลั่น

แอมโมเนียโดยมีสารละลายกรดบอริก (HBO_3) เป็นตัวจับแก๊สแอมโมเนีย แล้วไทเทรตหาแอมโมเนียที่ถูกจับในกรดบอริกด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน

4.3.8 สังกะสีที่สกัดได้ (extractable Zn) สกัดดินด้วยสารละลายไดเอธิลซีนไทรเอมีนเพนทาอะซีติกแอซิด (0.005 M DTPA pH 7.3) แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของสังกะสีที่สกัดได้ ด้วยเครื่อง AAS

4.3.9 สารหนูทั้งหมดในดิน (total As) ชั่งดิน 0.25 กรัม ใส่ในหลอดย่อยตัวอย่างขนาด 20 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้น (65% w/w HNO_3) ลงไป 1 มิลลิลิตร ย่อยที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จนกว่าควันสีน้ำตาลจะหายไป และเติมกรดไฮโดรคลอริก ลงไป 3 มิลลิลิตร ย่อยต่อด้วยการเพิ่มอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส จนได้สารละลายใส วางให้เย็นและปรับปริมาตรเป็น 20 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน เก็บสารละลายไว้วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนู โดย ใช้ เครื่อง Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) (Lynch, 1999)

4.3.10 เหล็กออกไซด์อสัณฐาน (amorphous Fe hydroxides) ชั่งดิน (ร่อนผ่านตะแกรงช่องเปิดขนาด <0.5 มิลลิเมตร) 0.5 กรัม ใส่ในหลอดเหวี่ยงพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร เติมแอมโมเนียมออกซาลेट (0.2 M NH_4^+ -oxalate) pH 3.0 ลงไป 25 มิลลิลิตร นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่า 4 ชั่วโมง (เขย่าในที่มืด) และนำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงโดยใช้ความเร็ว 2,000 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 15 นาที ค่อย ๆ รินสารละลายส่วนที่ใสลงในขวด วิเคราะห์เหล็กออกไซด์-อสัณฐาน โดยใช้เครื่อง AAS (Schwertmann, 1973)

4.3.11 เหล็กออกไซด์ที่เป็นผลึก (crystalline Fe hydroxides) ชั่งดิน (ร่อนผ่านตะแกรงช่องเปิดขนาด <0.5 มิลลิเมตร) 0.5 กรัม ใส่ในหลอดเหวี่ยงพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายบัฟเฟอร์ (Na-citrate 0.3 M+Na-bicarbonate 0.1 M) ลงไป 22.5 มิลลิลิตร นำไปต้มในน้ำที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เติมผงโซเดียมไดไฮโอไนต์ 0.5 กรัม (ไม่ต้องชั่ง) ลงในหลอด คนให้เข้ากัน 1-15 นาที เติมโซเดียมคลอไรด์ 5 มิลลิลิตร และอะซีโตน 5 มิลลิลิตร เพื่อให้ตกตะกอน นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงโดยใช้ความเร็ว 2,500 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 15 นาที ค่อย ๆ รินสารละลายส่วนที่ใสลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำซ้ำอีกสองครั้ง) และปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน วิเคราะห์เหล็กออกไซด์ที่เป็นผลึก โดยใช้เครื่อง (AAS) (Mehra and Jackson, 2013)

4.3.12 ร้อยละอนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว โดยวิธีปิเปต (pipette method) ชั่งดิน 10 กรัม ใส่บีกเกอร์ จำนวน 2 ชุด มากำจัดอินทรีย์วัตถุด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (50% w/w H_2O_2) นำบีกเกอร์ชุดที่หนึ่งไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อแห้งแล้วนำไปชั่งหาน้ำหนักเนื้อดินรวม บีกเกอร์ชุดที่สองนำมาเติม calgon (5% sodium hexametaphosphate) เพื่อให้อนุภาคดินกระจาย แยกขนาดของอนุภาคทราย โดยเทสารละลายใส่กระบอกตวงขนาด 1 ลิตร ผ่านกรวยกรองที่มีตะแกรงร่อนขนาด 0.044 มิลลิเมตร นำอนุภาคที่แยกได้ไปอบและชั่งหาน้ำหนักแห้ง ปริมาตรของสารละลายดินในกระบอกตวงให้เป็น 1 ลิตร จากนั้นเขย่าให้อนุภาคดินกระจายตัวอีกครั้ง ตั้งทิ้งไว้ 6.5 ชั่วโมง ให้อนุภาคดินตกตะกอนแล้วดูดสารละลายด้วยปิเปตที่ความลึก 10 เซนติเมตร ปริมาณ 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายที่ปิเปตได้ไปอบและชั่งหาน้ำหนักแห้งของอนุภาคดินเหนียวและนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว (Day, 1965)

4.3.13 วิเคราะห์รูปของสารหนูด้วยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น (sequential extraction) ตามวิธีของ Wenzel และคณะ (2001) ซึ่งสกัดสารหนูออกเป็น 5 รูป ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 สารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจง (non-specifically adsorbed) ชั่งดิน 1.00 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร เติมแอมโมเนียมซัลเฟต (0.05 M $(NH_4)_2SO_4$) 25 มิลลิลิตร เขย่าบนเครื่องเขย่า 4 ชั่วโมง นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงโดยใช้ความเร็ว 2,500 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 10 นาที กรองส่วนที่ใสผ่านกระดาษกรองวัตต์แมนเบอร์ 5 นำสารละลายที่ได้วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้เครื่อง ICP-OES

ขั้นตอนที่ 2 สารหนูที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (specifically adsorbed) เติมแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (0.05 M $(NH_4)H_2PO_4$) 25 มิลลิลิตร ลงไปในหลอดที่ยังมีดินจากขั้นตอนที่ 1 เขย่าบนเครื่องเขย่า 16 ชั่วโมง นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงโดยใช้ความเร็ว 2,500 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 10 นาที กรองส่วนที่ใสผ่านกระดาษกรองวัตต์แมนเบอร์ 5 นำสารละลายที่ได้วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้เครื่อง ICP-OES

ขั้นตอนที่ 3 สารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์อสัณฐาน (amorphous and poorly-crystalline hydrous oxides of Fe and Al) เติม 0.2 M NH_4 -oxalate buffer pH 3.25 ลงไป 25 มิลลิลิตร ลงไปในหลอดที่ยังมีดินจากขั้นตอนที่ 2 เขย่าบนเครื่องเขย่า 4 ชั่วโมง (เขย่าในที่มืด) นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงโดยใช้ความเร็ว 2,500 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 10 นาที กรองส่วนที่ใสผ่านกระดาษกรองวัตต์แมนเบอร์ 5 นำสารละลายที่ได้วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้เครื่อง ICP-OES

ขั้นตอนที่ 4 สารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผลึก (well-crystallized hydrous oxides of Fe and Al) เติมน้ำยาสกัด 0.2 M NH_4 -oxalate buffer+0.1 M ascorbic acid pH 3.25 ลงไป 25 มิลลิลิตร ในหลอดที่ยังมีดินจากขั้นตอนที่ 3 เขย่า 30 นาที (เขย่าในน้ำที่มีอุณหภูมิ 96 °C) นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงโดยใช้ความเร็ว 2,500 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 10 นาที กรองส่วนที่ใสผ่านกระดาษกรองวัตต์แมนเบอร์ 5 นำสารละลายที่ได้วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้เครื่อง ICP-OES

ขั้นตอนที่ 5 สารหนูส่วนที่เหลือ (residual phases) ดินในหลอดจากขั้นตอนที่ 4 นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 3 วัน ชั่งดิน 0.25 กรัม ใส่ในหลอดย่อยตัวอย่างขนาด 20 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้น (65% w/w HNO_3) ลงไป 1 มิลลิลิตร ย่อยที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จนกว่าควันสีน้ำตาลจะหายไป และเติมกรดไฮโดรคลอริกลงไป 3 มิลลิลิตร ย่อยต่อด้วยการเพิ่มอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส จนได้สารละลายใส วางให้เย็นและปรับปริมาตรเป็น 20 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน เก็บสารละลายไว้วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้เครื่อง ICP-OES (Lynch, 1999)

4.4 การวิเคราะห์ธาตุอาหารในพืช

4.4.1 ไนโตรเจน ด้วยวิธี Kjeldahl โดยชั่งตัวอย่างพืช 0.1000 กรัม (ทราบน้ำหนักที่แน่นอน) ย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (98% w/w H_2SO_4) แล้วเติมด่างและนำไปกลั่นหาแอมโมเนียม แล้วนำไปไทเทรตเพื่อหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน

4.4.2 ฟอสฟอรัส โปแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และสังกะสี โดยชั่งตัวอย่างพืช 0.1000 กรัม (ทราบน้ำหนักที่แน่นอน) ย่อยสลายด้วยกรดผสมไนตริกและเพอร์คลอริก ($\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$; 3:1) ย่อยตัวอย่างพืชจนใส แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส ด้วยวิธี Vanadomolybdate วัดด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer และวิเคราะห์โปแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และสังกะสี ด้วยเครื่อง AAS

4.4.3 สารหนูทั้งหมดในพืช ชั่งตัวอย่างพืช 0.1000 กรัม (ทราบน้ำหนักที่แน่นอน) ย่อยด้วยกรดไนตริก (65% w/w HNO_3) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% w/w H_2O_2) ย่อยตัวอย่างพืชจนได้สีเหลืองใส แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของสารหนู โดยใช้เครื่อง ICP-OES (Lu *et al.*, 2010)

บทที่ 3

ผลการทดลอง

การศึกษานี้ประกอบด้วย 2 การศึกษา คือ 1) สถานะสารหนูและสมบัติของดินที่ปนเปื้อนสารหนูจากอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช และ 2) ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตลดความเป็นพิษของสารหนูในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 โดยมีผลการทดลอง ดังนี้

1. สถานะสารหนูและสมบัติของดินที่ปนเปื้อนสารหนูจากอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช

1.1 สมบัติทั่วไปของดินปนเปื้อนสารหนู

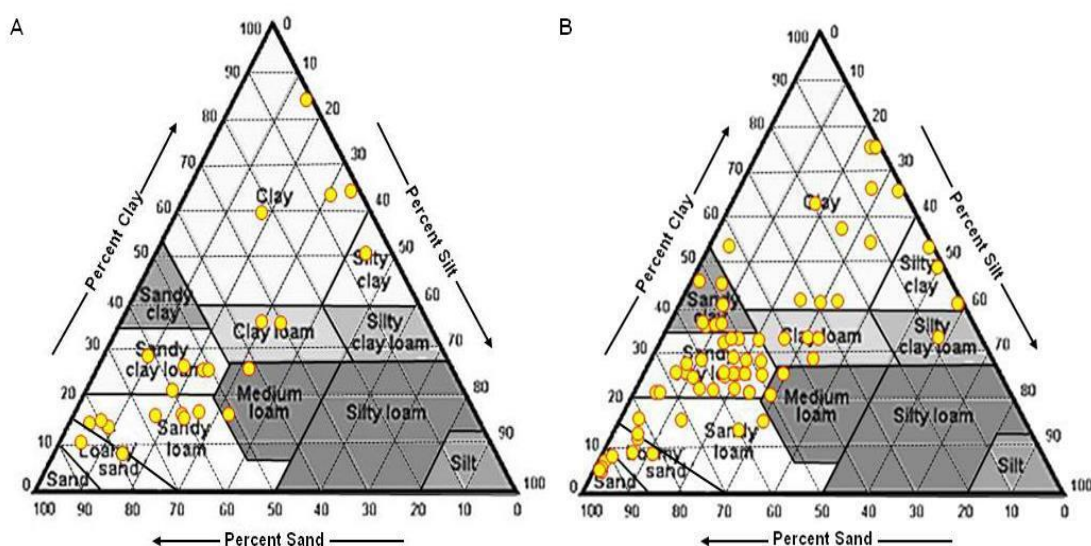
ดินบนและดินล่างมีสภาพเป็นกรดปานกลางถึงกรดเล็กน้อย (5.66–6.39 และ 5.96–6.42) (คณะกรรมการจัดทำพจนานุกรมบัญญัติวิทยา, 2551) ดินบนและดินล่างมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ (0.04–0.06 dS m⁻¹ และ 0.03–0.05 dS m⁻¹) (สมศรี, 2542) ปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำถึงปานกลางในดินบนและต่ำมากในดินล่าง (14.34–26.06 g kg⁻¹ และ 3.25–4.47 g kg⁻¹) (จรีรัตน์ และวรรณรัตน์, 2553) ไนโตรเจนทั้งหมดต่ำมากถึงต่ำในดินบนและต่ำในดินล่าง (0.78–1.40 g kg⁻¹ และ 0.23–0.32 g kg⁻¹) (Landon, 1991) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงถึงสูงมากในดินบนและปานกลางถึงสูงในดินล่าง (23.75–55.62 mg kg⁻¹ และ 11.19–24.07 mg kg⁻¹) (จรีรัตน์ และวรรณรัตน์, 2553) โพแทสเซียมที่สกัดได้ต่ำมากถึงต่ำในดินบนและต่ำมากในดินล่าง (0.14–0.23 cmol_c kg⁻¹ และ 0.07–0.10 cmol_c kg⁻¹) แคลเซียมที่สกัดได้ปานกลางถึงสูงในดินบนและปานกลางในดินล่าง (5.47–11.01 cmol_c kg⁻¹ และ 5.23–8.85 cmol_c kg⁻¹) (เอิบ, 2533) แมกนีเซียมที่สกัดได้และความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำถึงปานกลางในดินบนและต่ำในดินล่าง (0.81–1.56 cmol_c kg⁻¹, 0.56–0.90 cmol_c kg⁻¹ และ 8.06–13.94 cmol_c kg⁻¹, 7.96–10.70 cmol_c kg⁻¹ ตามลำดับ) (เอิบ, 2533; Hazelton and Murphy, 2007) ดินบนและดินล่างมีเหล็กออกไซด์อิสระสูงและที่เป็นผลึกสูง (3.40–6.52 g kg⁻¹, 3.07–4.48 g kg⁻¹ และ 3.90–7.42 g kg⁻¹, 5.09–6.96 g kg⁻¹ ตามลำดับ) (Otones *et al.*, 2011) (ตารางที่ 3.1) ส่วนใหญ่มีเนื้อดินเป็นดินร่วนปนทรายในดินบน (ภาพที่ 3.1A) และดินร่วนเหนียวปนทรายในดินล่าง (ภาพที่ 3.1B)

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางเคมีของดินบน (n=23) และดินล่าง (n=71) ที่ปนเปื้อนสารหนู จำนวน 23 บริเวณ

Soil properties ^a	Topsoil	Subsoil
pH	5.66–6.39	5.96–6.42
EC (dS m ⁻¹)	0.04–0.06	0.03–0.05
OM (g kg ⁻¹)	14.34–26.06	3.25–4.47
Total N (g kg ⁻¹)	0.78–1.40	0.23–0.32
Avail P (mg kg ⁻¹)	23.75–55.62	11.19–24.07
Extr.K (cmol _c kg ⁻¹)	0.14–0.23	0.07–0.10
Extr.Ca (cmol _c kg ⁻¹)	5.47–11.01	5.23–8.85
Extr.Mg (cmol _c kg ⁻¹)	0.81–1.56	0.56–0.90
CEC (cmol _c kg ⁻¹)	8.06–13.94	7.96–10.70
Amorphous Fe (g kg ⁻¹)	3.40–6.52	3.07–4.48
Crystalline Fe (g kg ⁻¹)	3.90–7.42	5.09–6.96

หมายเหตุ: ค่าที่ได้จากการประมาณค่าแบบช่วงที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

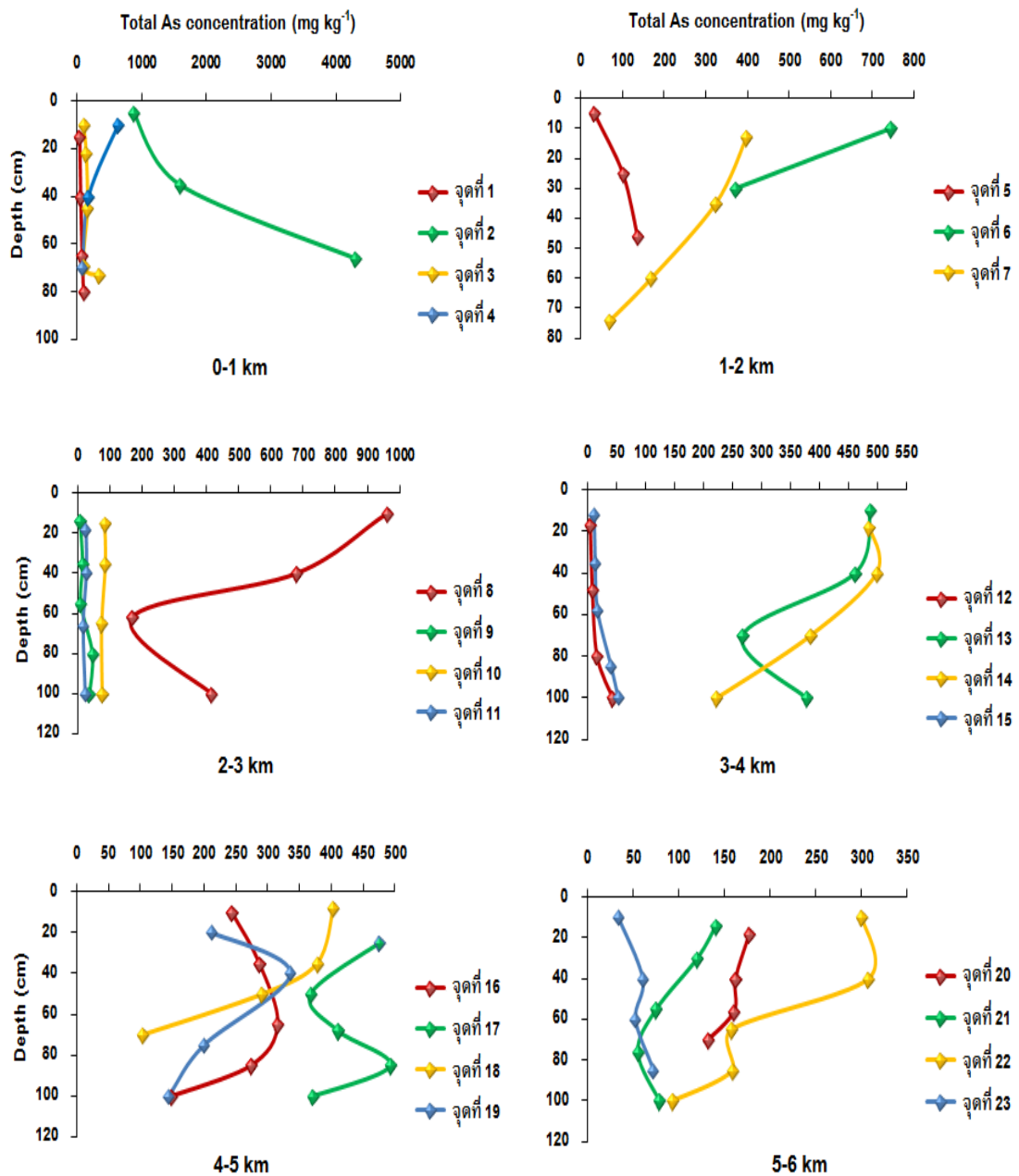
^a EC = electrical conductivity; OM = organic matter; Avail = available; Extr. = extractable; CEC = cation exchange capacity



ภาพที่ 3.1 ไดอะแกรมแสดงการแจกกระจายของร้อยละอนุภาคทราย อนุภาคทรายแป้ง และอนุภาคดินเหนียวของดินบน (n=23) (A) และดินล่าง (n=71) (B)

1.2 สถานะสารหนูทั้งหมดในดินอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช

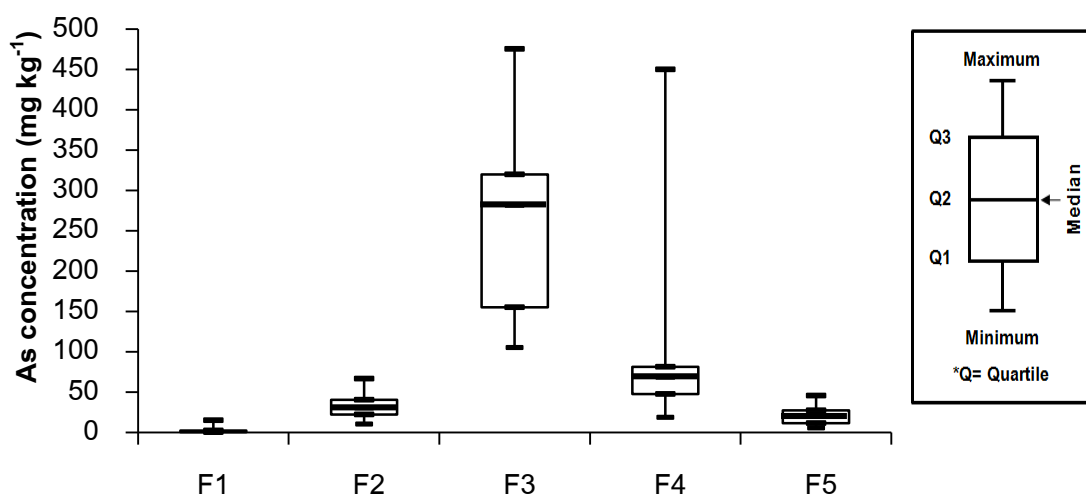
สารหนูทั้งหมดสูงทั้งดินบน ($173.4\text{--}426.5\text{ mg kg}^{-1}$) และดินล่าง ($129.9\text{--}383.7\text{ mg kg}^{-1}$) (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2547) ดินบนมีสารหนูทั้งหมดสูงกว่าดินล่าง ซึ่งระดับความลึกของชั้นดินเพิ่มขึ้นการแพร่กระจายของสารหนูทั้งหมดในดินลดลง แต่พบสารหนูทั้งหมดในดินบนน้อยกว่าดินล่างในจุดเก็บตัวอย่างดินที่ 2, 5, 16, 19 และ 23 (ภาพที่ 3.2)



ภาพที่ 3.2 สารหนูทั้งหมดในดินบนและดินล่างที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแตกต่างกัน

1.3 รูปของสารหนูในดิน

สารหนูทั้งหมดในดินบนและดินล่างมีปริมาณสูงมาก โดยในดินบนสารหนูทั้งหมดมีแนวโน้มสูงกว่าในดินล่าง (ภาพที่ 3.2) เมื่อทำการวิเคราะห์สารหนูรูปต่าง ๆ ในดินบนพบว่า สารหนูส่วนใหญ่อยู่ในรูป F3 (188.2–332.5 mg kg⁻¹) คิดเป็น 62.67 เปอร์เซ็นต์ของสารหนูทั้งหมด รองลงมา คือ F4 (25.65–170.6 mg kg⁻¹) คิดเป็น 23.62 เปอร์เซ็นต์ของสารหนูทั้งหมด ถัดมา คือ F2 (22.13–45.82 mg kg⁻¹) คิดเป็น 8.18 เปอร์เซ็นต์ของสารหนูทั้งหมด และรูป F5 (13.02–27.93 mg kg⁻¹) คิดเป็น 4.93 เปอร์เซ็นต์ของสารหนูทั้งหมด และพบว่า ในดินมีสารหนูรูป F1 น้อยที่สุด (0.18–5.22 mg kg⁻¹) คิดเป็น 0.61 เปอร์เซ็นต์ของสารหนูทั้งหมด (ภาพที่ 3.3) เมื่อนำสารหนูรูปต่าง ๆ มาหาความสัมพันธ์กัน พบความสัมพันธ์ระหว่าง F1 กับ F5 ($r = -0.619^*$) และพบความสัมพันธ์สูงระหว่าง F2 กับ F1+F2 ($r = 0.997^{**}$) นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่าง F2 กับ F3 ($r = 0.619^*$) และระหว่าง F4 กับ F5 ($r = 0.647^*$) (ตารางที่ 3.2)



ภาพที่ 3.3 ความเข้มข้นของสารหนูรูปต่าง ๆ ในดินบน

หมายเหตุ: F1 = nonspecifically adsorbed; F2 = specifically adsorbed; F3 = amorphous Fe and Al oxides; F4 = crystalline Fe and Al oxides; F5 = residual phases

ตารางที่ 3.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสารหนุรูปต่าง ๆ ในดินบน

As form	F1	F2	F1+F2	F3	F4
Topsoil					
F2	0.484				
F1+F2	0.545	0.997**			
F3	0.003	0.619*	0.593		
F4	-0.519	0.199	0.148	0.562	
F5	-0.619*	0.168	0.110	0.433	0.647*

หมายเหตุ: F1 = nonspecifically adsorbed; F2 = specifically adsorbed; F3 = amorphous Fe and Al oxides; F4 = crystalline Fe and Al oxides; F5 = residual phases

*, ** = ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ 99% ตามลำดับ

1.4 สหสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของดินและรูปของสารหนุในดินบน

สารหนุรูปต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กับสมบัติของดินบางประการ (ตารางที่ 3.3) โดยสารหนุรูป F1 และ F2 มีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุ ($r = 0.681^*$ และ $r = 0.606^*$) ไนโตรเจนทั้งหมด ($r = 0.687^*$ และ $r = 0.683^*$) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ($r = 0.770^{**}$ และ $r = 0.611^*$) สารหนุรูป F4 มีความสัมพันธ์กับความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ($r = 0.666^*$) และเหล็กออกไซด์ที่เป็นผลึก ($r = 0.629^*$) และสารหนุรูป F5 มีความสัมพันธ์กับความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ($r = 0.695^*$) เหล็กออกไซด์อสังฐาน ($r = 0.679^*$) และเหล็กออกไซด์ที่เป็นผลึก ($r = 0.629^*$)

ตารางที่ 3.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสารหนุรูปต่าง ๆ ในดินบนกับสมบัติของดิน

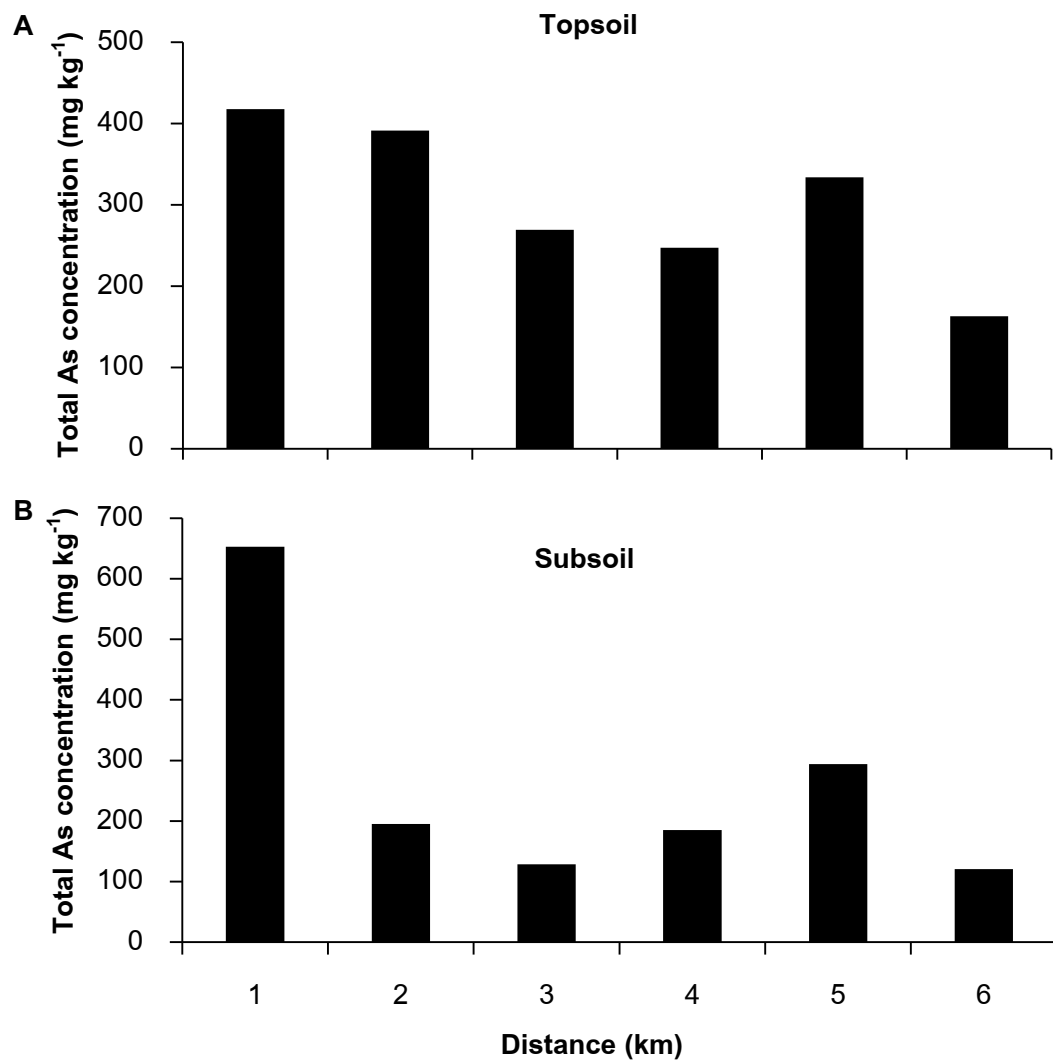
Soil property	Arsenic form				
	F1	F2	F3	F4	F5
Topsoil					
pH	-0.295	0.067	-0.261	0.230	-0.018
EC	0.517	0.413	0.041	-0.350	-0.484
OM	0.681*	0.606*	0.189	-0.497	-0.118
Total N	0.687*	0.683*	0.242	-0.459	-0.116
Avail P	0.770**	0.611*	-0.170	-0.533	-0.383

Soil property	Arsenic form				
	F1	F2	F3	F4	F5
Extr.K	-0.548	0.011	0.198	0.394	0.592
Extr.Ca	-0.479	0.156	0.215	0.542	0.448
Extr.Mg	-0.543	0.036	0.234	0.508	0.530
CEC	-0.496	0.174	0.353	0.666*	0.695*
Amorphous Fe	-0.506	0.201	0.560	0.594	0.679*
Crystalline Fe	-0.588	0.120	0.512	0.629*	0.629*
Clay	-0.633*	-0.092	0.251	0.581	0.588
distance from arsenic source	-0.663*	-0.665*	-0.480	-0.452	0.221

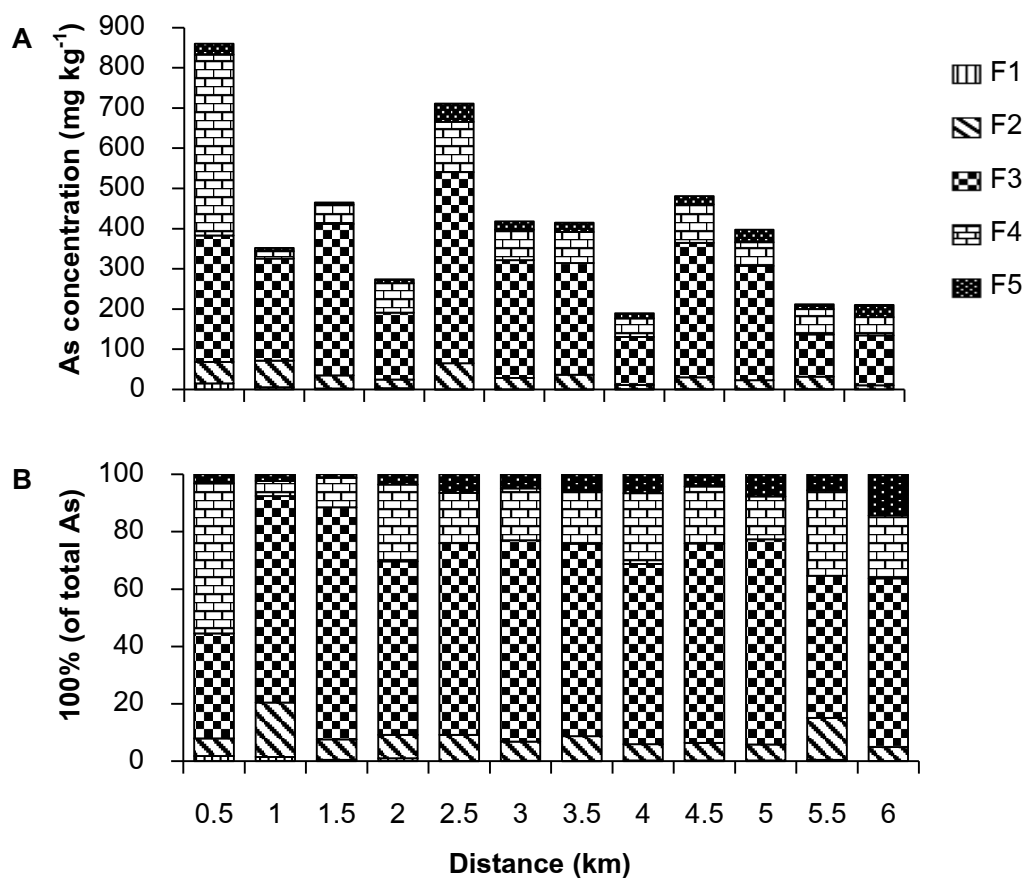
หมายเหตุ: F1 = nonspecifically adsorbed; F2 = specifically adsorbed; F3 = amorphous Fe and Al oxides; F4 = crystalline Fe and Al oxides; F5 = residual phases
*,** = ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และ 99% ตามลำดับ

1.5 ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูต่อรูปของสารหนูในดิน

การแพร่กระจายของสารหนูทั้งหมดในดินบนและดินล่างจากแหล่งกำเนิดสารหนู (ระยะห่าง 1–6 km) พบว่า สารหนูทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูเพิ่มขึ้น แต่พบสารหนูทั้งหมดในดินบนมากที่สุดจากแหล่งกำเนิดสารหนูที่ระยะห่าง 1 กิโลเมตร (417.6 mg kg^{-1}) ใกล้เคียงกับที่ระยะ 2 กิโลเมตร (391.4 mg kg^{-1}) (ภาพที่ 3.4A) และพบสารหนูทั้งหมดในดินล่างมากที่สุดที่ระยะห่าง 1 กิโลเมตร (653.1 mg kg^{-1}) (ภาพที่ 3.4B) จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปของสารหนูในดินบนกับระยะห่างจากแหล่งกำเนิด พบว่า สารหนูรูป F1 และ F2 ลดลงเมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูเพิ่มขึ้น ($r = -0.663^*$ และ $r = -0.665^*$) (ตารางที่ 3.3, ภาพที่ 3.5A) แต่สารหนูรูป F5 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 3.5A)



ภาพที่ 3.4 ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูต่อความเข้มข้นของสารหนูทั้งหมดในดินบน (n=23) (A) และดินล่าง (n=71) (B)



ภาพที่ 3.5 ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูต่อรูปของสารหนูในดินปน (n=12) (A) และร้อยละของสารหนูรูปต่างๆ เมื่อเทียบกับสารหนูทั้งหมดในดินปน (B)

หมายเหตุ: F1 = nonspecifically adsorbed; F2 = specifically adsorbed; F3 = amorphous Fe and Al oxides; F4 = crystalline Fe and Al oxides; F5 = residual phases

2. ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตลดความเป็นพิษของสารหนูในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1

2.1 สมบัติทางเคมีของดินก่อนและหลังสิ้นสุดการทดลอง

ดินก่อนการทดลองมีสภาพเป็นกรดจัด (5.54) (คณะกรรมการจัดทำพจนานุกรมปฐพีวิทยา, 2551) ค่าการนำไฟฟ้าต่ำ (0.02 dS m⁻¹) (สมศรี, 2542) อินทรีย์วัตถุต่ำ (13.07 g kg⁻¹) (จรีรัตน์ และววรรณรัตน์, 2553) ไนโตรเจนทั้งหมดต่ำ (0.72 g kg⁻¹) (Landon, 1991) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำ (9.47 mg kg⁻¹) (จรีรัตน์ และววรรณรัตน์, 2553) โพแทสเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ต่ำมาก (0.06 cmol_c kg⁻¹ และ 0.23 cmol_c kg⁻¹) แคลเซียมที่สกัดได้ต่ำ (2.55 cmol_c kg⁻¹) (เอิบ, 2533) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำมาก (5.10 cmol_c kg⁻¹)

(Hazelton and Murphy, 2007) สังกะสีที่สกัดได้ต่ำ (0.67 mg kg^{-1}) (Jones, 2001) และสารหนูทั้งหมดในดินสูง (10.53 mg kg^{-1}) (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2547) (ตารางที่ 3.4)

ตารางที่ 3.4 ค่าวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง

Chemical properties	Value
pH	5.54
EC (dS m^{-1})	0.02
OM (g kg^{-1})	13.07
Total N (g kg^{-1})	0.72
Avai. P (mg kg^{-1})	9.47
Extr. K ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0.06
Extr. Mg ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0.23
Extr. Ca ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	2.55
CEC ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	5.10
Extr. Zn (mg kg^{-1})	0.67
Total As (mg kg^{-1})	10.53

เมื่อสิ้นสุดการทดลองแล้วเก็บดินมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน พบว่าค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น สารหนูทั้งหมดเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าควบคุม (control) และค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (100, 200, 300 และ $400 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$) ร่วมกับการใส่สารหนู 20 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ดินมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น สารหนูทั้งหมดไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ตารางที่ 3.5 และ 3.6) และค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (100, 200, 300 และ $400 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$) แต่ไม่ใส่สารหนู ทำให้ดินมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.7)

ตารางที่ 3.5 ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (20 mg kg^{-1}) ต่อสมบัติทางเคมี ของดินหลังสิ้นสุดการทดลอง

Treatment	pH	EC	Extr.Zn	Avai. P	Total As
	(1:5)	(dS m^{-1})	-----	mg kg^{-1}	-----
P ₁₀₀ As ₀ (control)	5.19c	0.026c	0.64	13.20d	4.07b
P ₁₀₀ As ₂₀	6.06ab	0.137ab	0.60	34.09c	18.05a
P ₂₀₀ As ₂₀	5.77b	0.146a	0.60	41.86c	13.45a
P ₃₀₀ As ₂₀	6.38a	0.098b	0.57	53.04b	13.61a
P ₄₀₀ As ₂₀	6.22a	0.120ab	0.61	85.30a	16.09a
F-Test	**	**	NS	**	**
C.V. (%)	3.54	29.99	7.42	14.82	27.59

หมายเหตุ: ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

ตารางที่ 3.6 ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg^{-1}) ต่อสมบัติทางเคมี ของดินหลังสิ้นสุดการทดลอง

Treatment	pH	EC	Extr.Zn	Avai. P	Total As
	(1:5)	(dS m^{-1})	-----	mg kg^{-1}	-----
P ₁₀₀ As ₀ (control)	5.19d	0.026d	0.64ab	13.20e	4.07b
P ₁₀₀ As ₁₀	5.97bc	0.058bc	0.58b	41.75d	12.44a
P ₂₀₀ As ₁₀	5.88c	0.052c	0.69a	64.86c	10.66a
P ₃₀₀ As ₁₀	6.16ab	0.072ab	0.72a	94.14b	12.45a
P ₄₀₀ As ₁₀	6.24a	0.078a	0.71a	136.41a	13.46a
F-test	**	**	*	**	**
C.V. (%)	2.89	0	8.24	6.73	18.74

หมายเหตุ: * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ และ ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

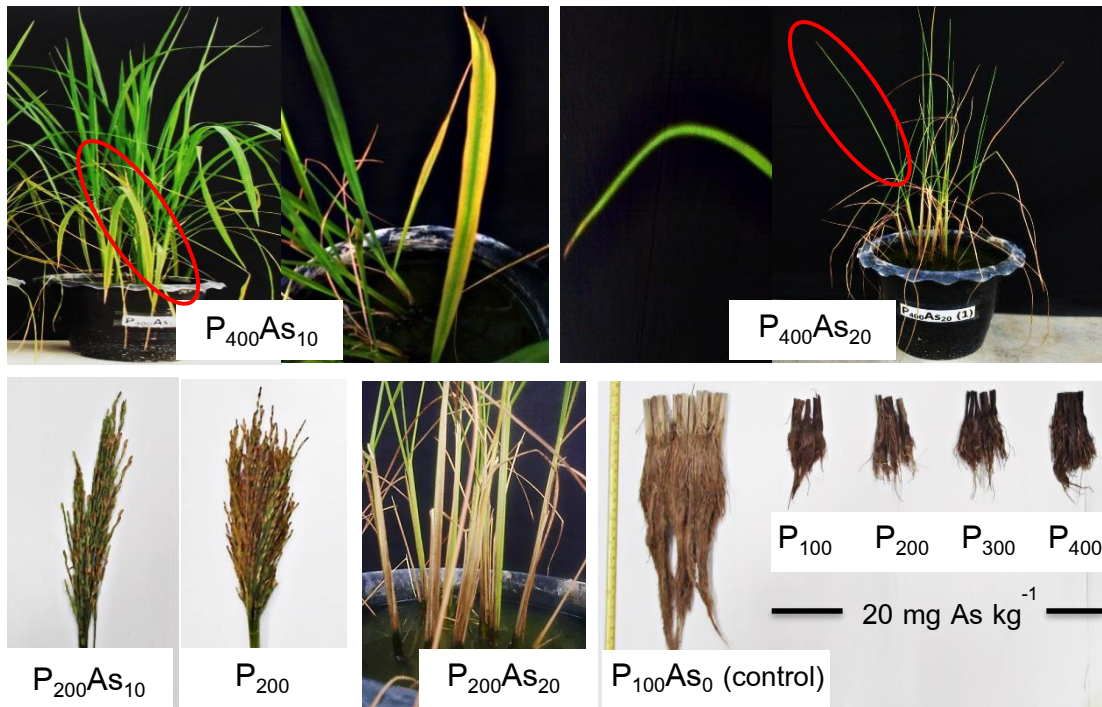
ตารางที่ 3.7 ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อสมบัติทางเคมีของดินหลังสิ้นสุดการทดลอง

Treatment	pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	Extr.Zn -----mg kg ⁻¹ -----	Avai. P	Total As
P ₁₀₀ (control)	5.18c	0.018b	0.70	14.43d	7.31
P ₂₀₀	5.25bc	0.019ab	0.78	32.92c	7.67
P ₃₀₀	5.31ab	0.020a	0.78	64.33b	7.11
P ₄₀₀	5.34a	0.021a	0.79	84.77a	7.21
F-Test	**	*	NS	**	NS
C.V. (%)	1.04	0	7.18	7.22	8.10

หมายเหตุ: * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

2.2 อาการเป็นพิษของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนสารหนู

ข้าวในดำรับการทดลองที่ใส่ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (100, 200, 300 และ 400 mg P₂O₅ kg⁻¹) ร่วมกับการใส่สารหนู 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เริ่มแสดงอาการเป็นพิษของสารหนูในช่วงระยะแตกกอของข้าว ทำให้ต้นข้าวชะงักการเจริญเติบโต ลำต้นแคระแกร็นแตกกออ่อน ขอบใบม้วนเข้าหากัน หลังจากนั้นใบข้าวหงิกงอและแห้ง รากสั้นและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลดำ ต้นข้าวตายก่อนถึงระยะเก็บเกี่ยว ส่วนดำรับการทดลองที่ใส่ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (100, 200, 300 และ 400 mg P₂O₅ kg⁻¹) ร่วมกับการใส่สารหนู 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เริ่มแสดงอาการเป็นพิษของสารหนูในข้าวในช่วงระยะสร้างช่อดอกอ่อนของข้าว โดยเริ่มแสดงอาการที่ใบล่างก่อน ปลายใบเริ่มมีสีแดง แผ่นใบเหลือง และขยายไปสู่เส้นกลางใบ การผลิตดอกออกร่วงลดลง เมล็ดข้าวลีบ และดำรับการทดลองที่ใส่ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (100, 200, 300 และ 400 mg P₂O₅ kg⁻¹) แต่ไม่ใส่สารหนู เริ่มแสดงอาการเป็นพิษของสารหนูในช่วงระยะสร้างช่อดอกอ่อนของข้าว โดยเริ่มแสดงอาการที่ใบล่างก่อน ปลายใบเริ่มมีสีแดง แผ่นใบเหลือง และขยายไปสู่เส้นกลางใบ การผลิตดอกออกร่วงลดลง เมล็ดข้าวลีบ แต่ระดับอาการเป็นพิษของสารหนูในข้าวลดลง (ภาพที่ 3.6)



ภาพที่ 3.6 ผลของสารหนูต่ออาการเป็นพิษของข้าว

2.3 ผลการใช้ทริบเฟิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนสารหนู

ข้าวที่ปลูกในตำรับการทดลองที่ใส่สารหนู 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ช่วงระยะแตกกอ ระยะสร้างช่อดอกอ่อน และระยะโผล่ช่อดอกและเกสร พบว่า ความสูงของต้นและจำนวนกอลดลง ส่งผลให้น้ำหนักแห้งของรากและตอช้งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม

ตำรับการทดลองที่ใส่ทริบเฟิลซูเปอร์ฟอสเฟตเพิ่มขึ้น (100, 200, 300 และ 400 mg P₂O₅ kg⁻¹) ร่วมกับการใส่สารหนู 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ความสูงของต้น จำนวนกอ น้ำหนักแห้งของรากและตอช้ง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ แต่ตำรับการทดลองที่ใส่ทริบเฟิลซูเปอร์ฟอสเฟต (400 mg P₂O₅ kg⁻¹) ร่วมกับการใส่สารหนู 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ต้นข้าวตายในช่วงระยะโผล่ช่อดอกและเกสร (ภาพที่ 3.7 และตารางที่ 3.8, 3.9, 3.10)



ภาพที่ 3.7 ผลการใช้ทริบเฟอโรสเฟอโรสเฟอโรสร่วมกับสารหนู (20 mg kg^{-1}) ต่อการเจริญเติบโตของข้าวในช่วงระยะแตกกอ (A) ระยะสร้างช่อดอกอ่อน (B) ระยะโผล่ช่อดอกและเกสร (C) และระยะเก็บเกี่ยว (D)

ตารางที่ 3.8 ผลการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (20 mg kg^{-1}) ต่อความสูงของข้าว

Treatment	Plant height (cm)		
	Tillering	PI	Flowering
P ₁₀₀ As ₀ (control)	96.28a	112.58a	118.87a
P ₁₀₀ As ₂₀	67.09b	68.36b	59.96b
P ₂₀₀ As ₂₀	66.61b	68.10b	51.06b
P ₃₀₀ As ₂₀	67.05b	69.34b	52.33b
P ₄₀₀ As ₂₀	69.92b	70.26b	ND
F-Test	**	**	**
C.V. (%)	6.99	7.16	24.85

หมายเหตุ: ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$ และ ND คือ ไม่มีข้อมูลเพราะต้นข้าวตาย
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

ตารางที่ 3.9 ผลการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (20 mg kg^{-1}) ต่อจำนวนกอของข้าว

Treatment	Number tiller/pot		
	Tillering	PI	Flowering
P ₁₀₀ As ₀ (control)	8.71a	13.50a	14.38a
P ₁₀₀ As ₂₀	1.86b	1.75b	0.63b
P ₂₀₀ As ₂₀	2.07b	2.25b	0.50b
P ₃₀₀ As ₂₀	2.89b	2.75b	1.00b
P ₄₀₀ As ₂₀	3.22b	2.75b	ND
F-Test	**	**	**
C.V. (%)	48.65	59.14	44.86

หมายเหตุ: ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$ และ ND คือ ไม่มีข้อมูลเพราะต้นข้าวตาย
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

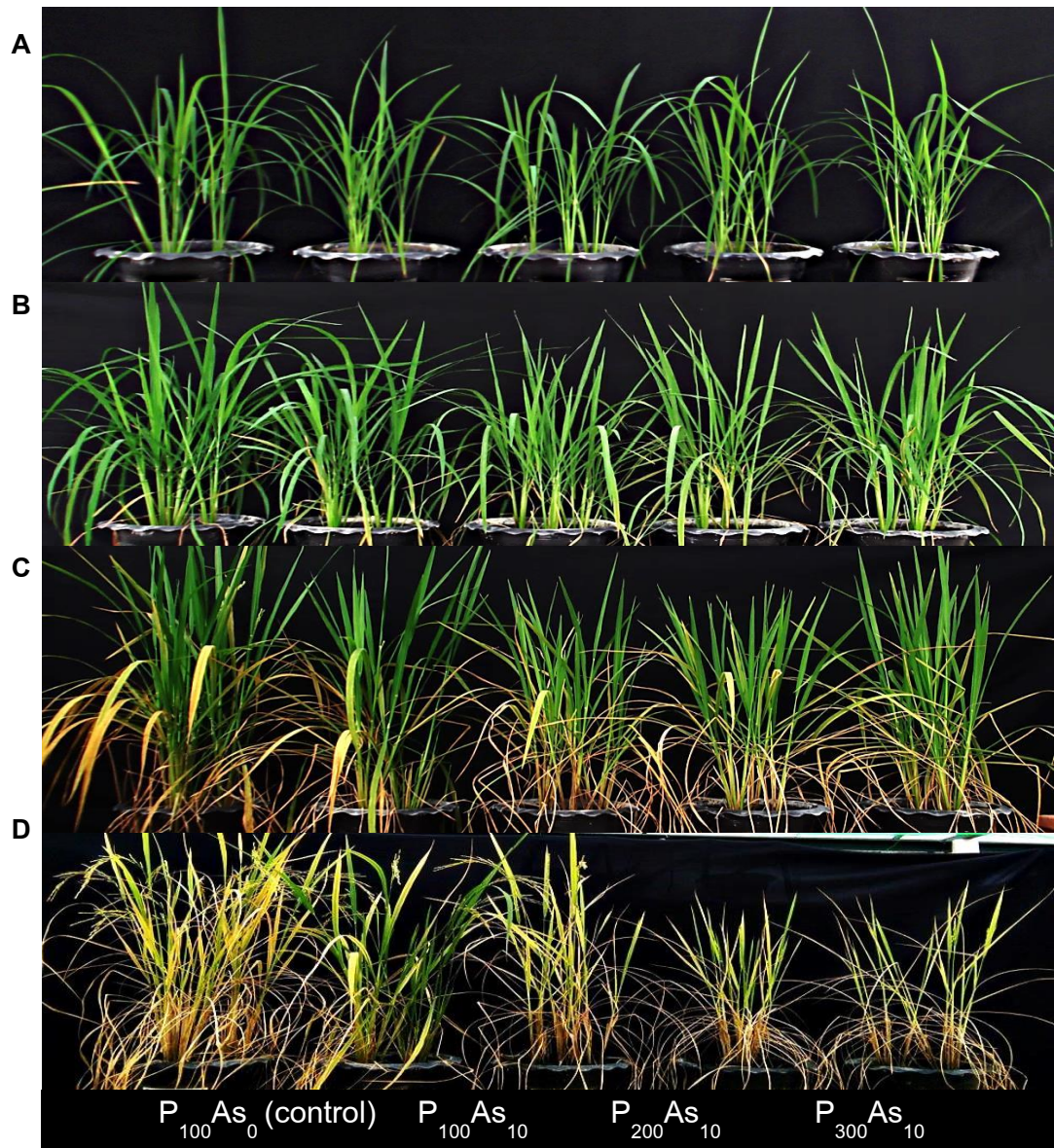
ตารางที่ 3.10 ผลการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (20 mg kg⁻¹) ต่อน้ำหนักแห้งของข้าว

Treatment	Dry root	Dry straw
	-----g pot ⁻¹ -----	
P ₁₀₀ As ₀ (control)	14.60a	45.69a
P ₁₀₀ As ₂₀	1.19b	2.33b
P ₂₀₀ As ₂₀	1.43b	2.63b
P ₃₀₀ As ₂₀	1.92b	3.28b
P ₄₀₀ As ₂₀	1.09b	1.96b
F-Test	**	**
C.V. (%)	38.12	21.58

หมายเหตุ: ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

ข้าวที่ปลูกในตำรับการทดลองที่ใส่สารหนู 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทุกช่วงระยะการเจริญเติบโต พบว่า ความสูงของต้นและจำนวนกอลดลง ส่งผลให้น้ำหนักแห้งของตอซังและเมล็ด ผลผลิตเมล็ด (grain yield) ที่ความชื้น 14 เปอร์เซ็นต์ และผลผลิตต่อไร่ ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม

ตำรับการทดลองที่ใส่ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตเพิ่มขึ้น (100, 200, 300 และ 400 mg P₂O₅ kg⁻¹) ร่วมกับการใส่สารหนู 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ช่วงระยะแตกกอ ระยะสร้างช่อดอกก่อน พบว่า ความสูงของต้นไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่ช่วงระยะโผล่ช่อดอกและเกสร และระยะเก็บเกี่ยว พบว่า ความสูงของต้นมีแนวโน้มลดลง จำนวนกอของข้าวทุกช่วงระยะการเจริญเติบโตไม่มีความแตกต่างทางสถิติ น้ำหนักแห้งของเมล็ดและผลผลิตเมล็ดที่ความชื้น 14 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ แต่ผลผลิตต่อไร่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงที่สุดในตำรับการทดลองที่ใส่ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (200 mg P₂O₅ kg⁻¹) (ภาพที่ 3.8 และตารางที่ 3.11, 3.12, 3.13)



ภาพที่ 3.8 ผลการใช้ทริบิเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg^{-1}) ต่อการเจริญเติบโตของข้าวในช่วงระยะแตกกอ (A) ระยะสร้างช่อดอกอ่อน (B) ระยะโผล่ช่อดอกและเกสร (C) และระยะเก็บเกี่ยว (D)

ตารางที่ 3.11 ผลการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg^{-1}) ต่อความสูงของข้าว

Treatment	Plant height (cm)			
	Tillering	PI	Flowering	Harvesting
P ₁₀₀ As ₀ (control)	96.28a	112.58a	118.87a	122.21a
P ₁₀₀ As ₁₀	82.68b	95.49b	104.82b	106.25ab
P ₂₀₀ As ₁₀	86.10b	94.24b	105.15b	109.07ab
P ₃₀₀ As ₁₀	87.30b	92.56b	92.98c	93.49b
P ₄₀₀ As ₁₀	84.29b	88.75b	90.73c	91.07b
F-Test	**	**	**	*
C.V. (%)	3.78	7.05	8.37	11.23

หมายเหตุ: * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ และ ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

ตารางที่ 3.12 ผลการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg^{-1}) ต่อจำนวนกอและความยาวของรวงข้าว

Treatment	Number tiller/pot				Panicle length (cm)
	Tillering	PI	Flowering	Harvest	
P ₁₀₀ As ₀ (control)	8.71a	13.50a	14.38a	14.06a	30.50a
P ₁₀₀ As ₁₀	4.79b	6.13b	7.00b	7.75b	27.10a
P ₂₀₀ As ₁₀	6.29b	7.75b	8.63b	8.94b	27.90a
P ₃₀₀ As ₁₀	6.22b	7.75b	7.38b	7.25b	20.45ab
P ₄₀₀ As ₁₀	6.53b	7.63b	7.25b	7.13b	11.45b
F-Test	*	**	**	**	*
C.V. (%)	21.85	26.91	20.01	16.50	32.22

หมายเหตุ: * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ และ ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

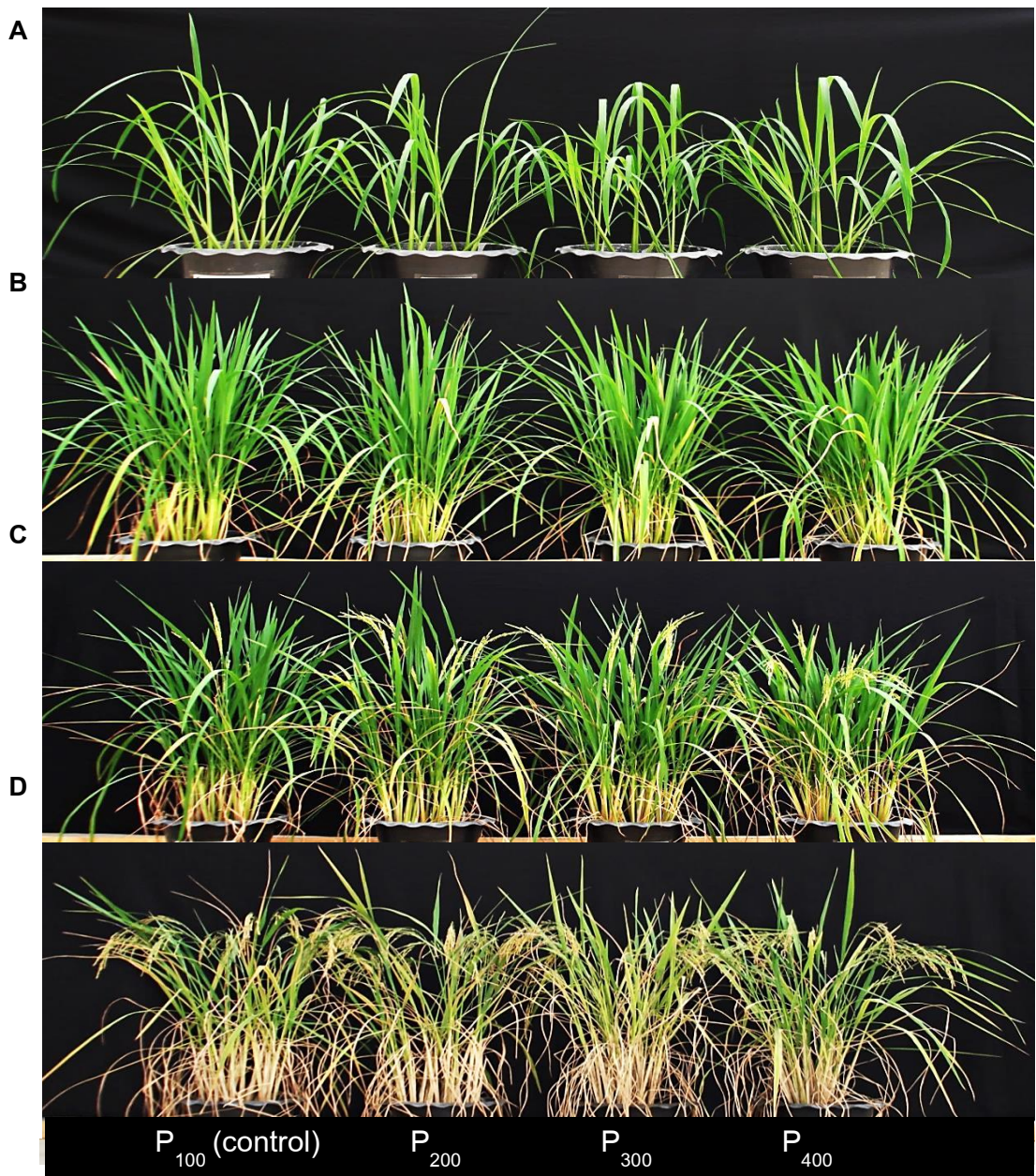
ตารางที่ 3.13 ผลการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg^{-1}) ต่อน้ำหนักแห้งของข้าว

Treatment	Dry root	Dry straw	Dry grain	Grain yield	Grain yield
	-----g pot ⁻¹ -----				----kg rai ⁻¹ --
P ₁₀₀ As ₀ (control)	14.60	45.69a	23.20a	29.72a	932.54a
P ₁₀₀ As ₁₀	11.11	24.72bc	3.85b	5.23b	165.92b
P ₂₀₀ As ₁₀	13.18	28.13b	5.17b	6.79b	213.08b
P ₃₀₀ As ₁₀	9.58	21.34bc	0.30b	0.39b	12.39c
P ₄₀₀ As ₁₀	9.53	17.18c	0.78b	1.01b	31.79c
F-Test	NS	**	**	**	**
C.V. (%)	25.80	23.26	64.51	63.36	63.36

หมายเหตุ: ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

ข้าวที่ปลูกได้รับการทดลองที่ใส่ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตเพิ่มขึ้น (100, 200, 300 และ $400 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$) แต่ไม่ใส่สารหนู ทุกช่วงระยะเวลาการเจริญเติบโต พบว่า ความสูงของต้นไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงสุดในตำรับการทดลองที่ใส่ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ($200 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$) จำนวนกอของข้าวไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) ในช่วงระยะแตกกอ แต่ระยะสร้างช่อดอกอ่อน ระยะโผล่ช่อดอกและเกสร และระยะเก็บเกี่ยว พบว่า จำนวนกอเพิ่มขึ้น ความยาวของรวงข้าวไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงสุดในตำรับการทดลองที่ใส่ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ($200 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$) ส่งผลให้น้ำหนักแห้งของราก ตอซัง เมล็ด และผลผลิตเมล็ดที่ความชื้น 14 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) อย่างไรก็ตาม น้ำหนักแห้งเมล็ด ผลผลิตเมล็ดที่ความชื้น 14 เปอร์เซ็นต์ และผลผลิตต่อไร่ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงสุดในตำรับการทดลองที่ใส่ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต ($200 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$) (ภาพที่ 3.9 และตารางที่ 3.14, 3.15, 3.16)



ภาพที่ 3.9 ผลการใช้ทริบเปิดซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตของข้าวในช่วงระยะแตกกอ (A) ระยะสร้างช่อดอกอ่อน (B) ระยะโผล่ช่อดอกและเกสร (C) และระยะเก็บเกี่ยว (D)

ตารางที่ 3.14 ผลการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (ไม่ใส่สารหนู) ต่อความสูงของข้าว

Treatment	Plant height (cm)			
	Tillering	PI	Flowering	Harvesting
P ₁₀₀ (control)	93.75	109.13	113.39	116.03
P ₂₀₀	94.57	112.21	118.63	120.90
P ₃₀₀	93.42	108.25	113.63	116.27
P ₄₀₀	95.82	108.24	112.56	113.38
F-Test	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	2.68	4.23	4.46	4.12

หมายเหตุ: NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

ตารางที่ 3.15 ผลการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (ไม่ใส่สารหนู) ต่อจำนวนกอและความยาวของรวงข้าว

Treatment	Number tiller/pot				Panicle length (cm)
	Tillering	PI	Flowering	Harvest	
P ₁₀₀ (control)	11.83	20.00b	20.38c	20.25c	28.78
P ₂₀₀	11.88	21.25b	21.75bc	21.50bc	29.35
P ₃₀₀	12.75	23.00ab	24.75ab	24.50b	27.68
P ₄₀₀	14.50	27.00a	28.38a	28.42a	27.63
F-Test	NS	*	**	**	NS
C.V. (%)	21.45	12.57	10.77	10.26	5.31

หมายเหตุ: * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

ตารางที่ 3.16 ผลการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (ไม่ใส่สารหนู) ต่อน้ำหนักแห้งของข้าว

Treatment	Dry root	Dry straw	Dry grain	Grain yield	Grain yield
	-----g pot ⁻¹ -----				----kg rai ⁻¹ --
P ₁₀₀ (control)	14.38	43.54	32.53	43.83	1,374.98
P ₂₀₀	14.40	45.39	33.81	45.35	1,422.76
P ₃₀₀	15.47	47.57	31.58	42.22	1,324.51
P ₄₀₀	16.95	49.40	33.35	43.94	1,378.35
F-Test	NS	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	14.61	7.62	12.18	11.56	11.55

หมายเหตุ: NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

2.4 ผลการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อความเข้มข้นของสารหนูและธาตุอาหารในข้าว

ข้าวที่ปลูกในตำรับการทดลองที่ใส่สารหนู 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ความเข้มข้นของธาตุต่างๆ ในราก+ตอซัง พบว่า ความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และสังกะสีลดลง แต่ความเข้มข้นของสารหนูเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม และตำรับการทดลองที่ใส่ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตเพิ่มขึ้น (100, 200, 300 และ 400 mg P₂O₅ kg⁻¹) ร่วมกับการใส่สารหนู 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจนและสังกะสีไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ในขณะที่เดียวกันความเข้มข้นของธาตุฟอสฟอรัสและสารหนูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.17)

ตารางที่ 3.17 ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (20 mg kg^{-1}) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารในราก+ตอซังของข้าว

Treatment	Root+ Straw nutrients						
	N	P	K	Ca	Mg	Zn	As
	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----	
P ₁₀₀ As ₀ (control)	21.02a	2.53a	8.34b	4.66	1.34	89.45a	146.14c
P ₁₀₀ As ₂₀	14.33b	1.32b	11.68a	5.43	1.43	29.52b	279.64b
P ₂₀₀ As ₂₀	13.44b	1.53b	9.69ab	5.20	1.44	23.06b	403.07ab
P ₃₀₀ As ₂₀	13.70b	1.55b	8.89b	4.80	1.34	20.27b	316.64b
P ₄₀₀ As ₂₀	14.48b	2.36a	8.57b	5.96	1.47	22.25b	505.82a
F-Test	**	**	*	NS	NS	**	*
C.V. (%)	7.50	15.12	16.36	14.04	7.48	16.40	52.12

หมายเหตุ: * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

ข้าวที่ปลูกในดำรับการทดลองที่ใส่สารหนู 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ในราก พบว่า ความเข้มข้นของธาตุแมกนีเซียมและสังกะสีลดลง แต่ความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจน แคลเซียม และสารหนู ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุม (ตารางที่ 3.18) ส่วนความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ในตอซัง พบว่า ความเข้มข้นของธาตุแคลเซียมและสังกะสีลดลง แต่ความเข้มข้นของธาตุสารหนูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และแมกนีเซียมไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุม (ตารางที่ 3.19) ส่วนความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ในเมล็ด พบว่า ความเข้มข้นของธาตุสังกะสีและสารหนูลดลง ความเข้มข้นของธาตุแคลเซียมไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับดำรับควบคุม (ตารางที่ 3.20)

ดำรับการทดลองที่ใส่ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตเพิ่มขึ้น (100, 200, 300 และ 400 mg P₂O₅ kg⁻¹) ร่วมกับการใส่สารหนู 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ในราก พบว่า ความเข้มข้นของธาตุฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของธาตุแมกนีเซียมและสังกะสีไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ตารางที่ 3.18) ส่วนความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ในตอซัง พบว่า ความเข้มข้นของธาตุแคลเซียมไม่มีความแตกต่างทางสถิติ แต่ความเข้มข้นของสารหนูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.19) และดำรับการทดลองที่ใส่ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต

(200 mg P₂O₅ kg⁻¹) ร่วมกับการใส่สารหนู 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ความเข้มข้นของสารหนูในเมล็ด เท่ากับ 0.30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่ไม่พบความเข้มข้นของสารหนูในเมล็ดข้าวในตำรับการทดลองอื่น ๆ (ตารางที่ 3.20)

ตารางที่ 3.18 ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg⁻¹) ต่อความเข้มข้นของสารหนูและธาตุอาหารในรากของข้าว

Treatment	Root nutrients						
	N	P	K	Ca	Mg	Zn	As
	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ ----	
P ₁₀₀ As ₀ (control)	9.75	0.87b	1.11b	1.14	0.32a	63.47a	128.42
P ₁₀₀ As ₁₀	10.35	0.61c	1.34b	0.96	0.27b	27.77b	226.90
P ₂₀₀ As ₁₀	10.07	0.85bc	1.61ab	0.93	0.27b	27.37b	200.66
P ₃₀₀ As ₁₀	12.45	1.10b	2.01a	1.03	0.29b	19.96b	206.56
P ₄₀₀ As ₁₀	12.55	1.42a	2.00a	1.03	0.29b	20.78b	257.04
F-Test	NS	**	*	NS	*	**	NS
C.V. (%)	16.36	16.29	22.93	11.66	0	20.01	29.11

หมายเหตุ: * คือ แตกต่างทางสถิติที่ P≤0.05, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ P≤0.01 และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05 ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

ตารางที่ 3.19 ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg^{-1}) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารในตอซังของข้าว

Treatment	Straw nutrients						
	N	P	K	Ca	Mg	Zn	As
	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----	
P ₁₀₀ As ₀ (control)	11.28	1.66	7.23	3.52a	1.01	25.98a	17.72d
P ₁₀₀ As ₁₀	13.19	1.13	9.65	2.56b	1.14	16.46b	23.00b
P ₂₀₀ As ₁₀	11.28	1.18	8.31	2.26b	0.99	10.50c	20.47b
P ₃₀₀ As ₁₀	11.96	1.59	9.73	2.33b	1.17	11.77bc	30.61ab
P ₄₀₀ As ₁₀	11.98	1.99	10.27	2.77b	1.35	12.82bc	43.68a
F-Test	NS	NS	NS	**	NS	**	*
C.V. (%)	10.24	12.57	15.81	14.38	17.64	22.18	39.13

หมายเหตุ: * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

ตารางที่ 3.20 ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตร่วมกับสารหนู (10 mg kg^{-1}) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารในเมล็ดของข้าว

Treatment	Grain nutrients					
	P	K	Ca	Mg	Zn	As
	-----g kg ⁻¹ -----				-----mg kg ⁻¹ -----	
P ₁₀₀ As ₀ (control)	2.96a	2.61a	0.28	1.15a	16.79a	0.93±0.64
P ₁₀₀ As ₁₀	2.08ab	1.78ab	0.09	0.80ab	10.20ab	Not detected
P ₂₀₀ As ₁₀	3.06a	2.45a	0.28	1.16a	10.85ab	0.30±0.14
P ₃₀₀ As ₁₀	0.78b	0.60b	0.12	0.30b	2.73b	Not detected
P ₄₀₀ As ₁₀	0.78b	0.63b	0.07	0.28b	2.63b	Not detected
F-Test	*	*	NS	*	*	
CV (%)	62.14	59.68	89.74	60.68	63.58	

หมายเหตุ: * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

ข้าวที่ปลูกในตำรับการทดลองที่ใส่ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตเพิ่มขึ้น (100, 200, 300 และ 400 mg P₂O₅ kg⁻¹) แต่ไม่ใส่สารหนู ความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ในราก พบว่า ความเข้มข้นของธาตุฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของธาตุแคลเซียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจน โพแทสเซียม แมกนีเซียม และสารหนู ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05) (ตารางที่ 3.21) ความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ในตอซัง พบว่า ความเข้มข้นของธาตุฟอสฟอรัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของธาตุโพแทสเซียมแนวโน้มลดลง แต่ความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจน แคลเซียม แมกนีเซียม สังกะสี และสารหนู ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05) (ตารางที่ 3.22) ส่วนความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ในเมล็ด พบว่า ความเข้มข้นของธาตุแคลเซียม แมกนีเซียม และสารหนู มีแนวโน้มลดลง แต่ความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจนและโพแทสเซียมไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (P>0.05) (ตารางที่ 3.23)

ตารางที่ 3.21 ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (ไม่ใส่สารหนู) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารในรากของข้าว

Treatment	Root nutrients						
	N	P	K	Ca	Mg	Zn	As
	-----g kg ⁻¹ -----						-----mg kg ⁻¹ -----
P ₁₀₀ (control)	7.89	1.01d	0.35	1.15bc	0.26	28.04b	209.85
P ₂₀₀	8.11	2.04c	0.47	0.87c	0.28	29.42a	195.70
P ₃₀₀	8.09	3.13b	0.38	1.90b	0.28	16.35d	179.19
P ₄₀₀	8.22	4.69a	0.50	2.58a	0.30	19.31c	197.31
F-Test	NS	**	NS	**	NS	*	NS
C.V. (%)	5.89	18.59	32.28	27.72	11.26	28.40	16.36

หมายเหตุ: * คือ แตกต่างทางสถิติที่ P≤0.05, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ P≤0.01 และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05 ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

ตารางที่ 3.22 ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (ไม่ใส่สารหนู) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารในตอซังของข้าว

Treatment	Straw nutrients						
	N	P	K	Ca	Mg	Zn	As
	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----	
P ₁₀₀ (control)	9.22	1.56b	5.66a	4.22	0.91	22.26	17.78
P ₂₀₀	9.53	2.07a	6.03a	3.84	0.98	21.97	18.32
P ₃₀₀	8.65	2.17a	4.81ab	3.90	0.92	17.60	16.83
P ₄₀₀	8.11	2.21a	3.83b	4.35	0.90	24.83	16.72
F-Test	NS	**	*	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	8.64	9.72	17.20	14.46	11.83	20.69	12.57

หมายเหตุ: * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

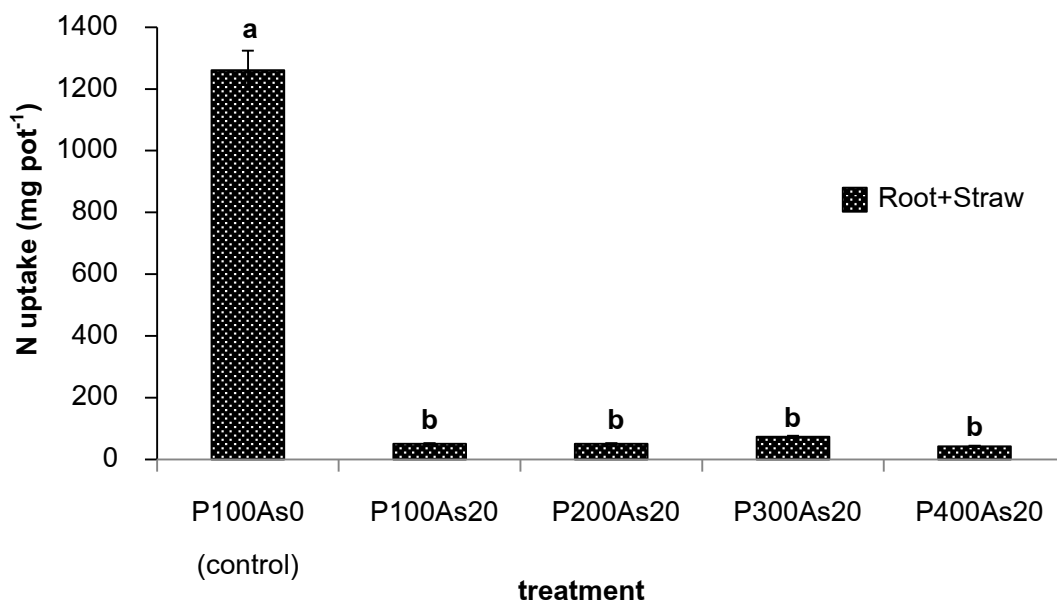
ตารางที่ 3.23 ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (ไม่ใส่สารหนู) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารในเมล็ดของข้าว

Treatment	Grain nutrients						
	N	P	K	Ca	Mg	Zn	As
	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----	
P ₁₀₀ (control)	14.14	1.89c	2.22	0.35a	0.78a	6.05b	1.64a
P ₂₀₀	14.33	2.32a	2.36	0.20ab	0.78a	5.26b	0.60b
P ₃₀₀	13.69	2.12b	2.23	0.03b	0.69ab	7.53b	0.50b
P ₄₀₀	14.19	2.10b	2.18	0.10b	0.64b	13.80a	0.60b
F-Test	NS	**	NS	*	*	**	**
CV (%)	4.17	6.19	6.89	74.49	8.77	19.43	43.45

หมายเหตุ: * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

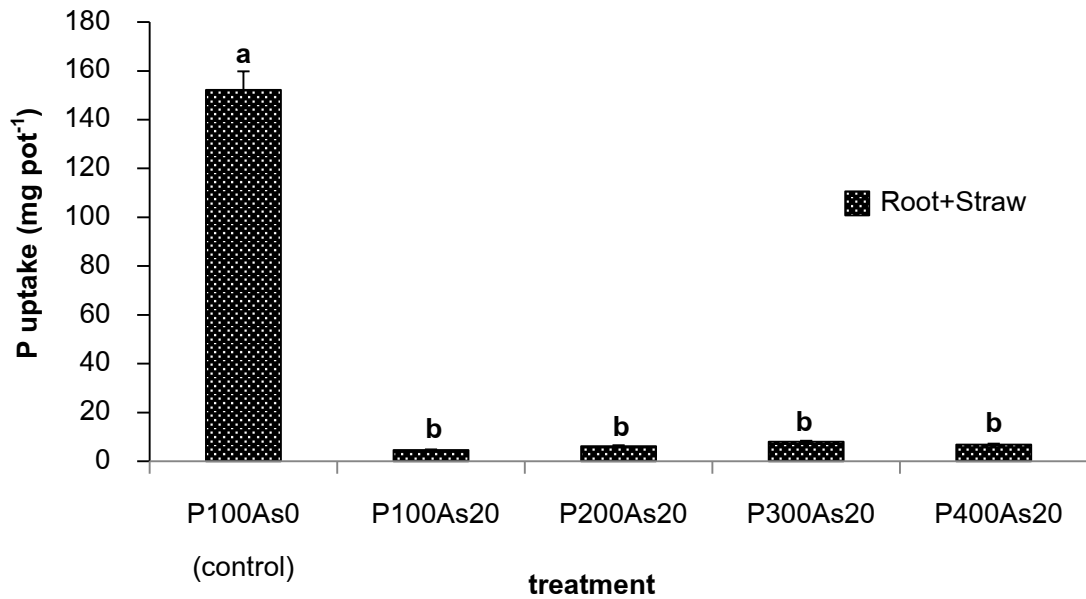
2.5 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้สารหนูและธาตุอาหารในข้าว

ข้าวที่ปลูกในตำรับการทดลองที่ใส่สารหนู 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การดูดใช้ธาตุต่าง ๆ ในราก+ตอซัง พบว่า การดูดใช้ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม สังกะสี และสารหนูลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม ส่วนตำรับการทดลองที่ใส่ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (100, 200, 300 และ 400 mg P₂O₅ kg⁻¹) ร่วมกับการใส่สารหนู 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การดูดใช้ธาตุต่าง ๆ ในราก+ตอซัง พบว่า การดูดใช้ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม สังกะสี และสารหนู ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ภาพที่ 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16)



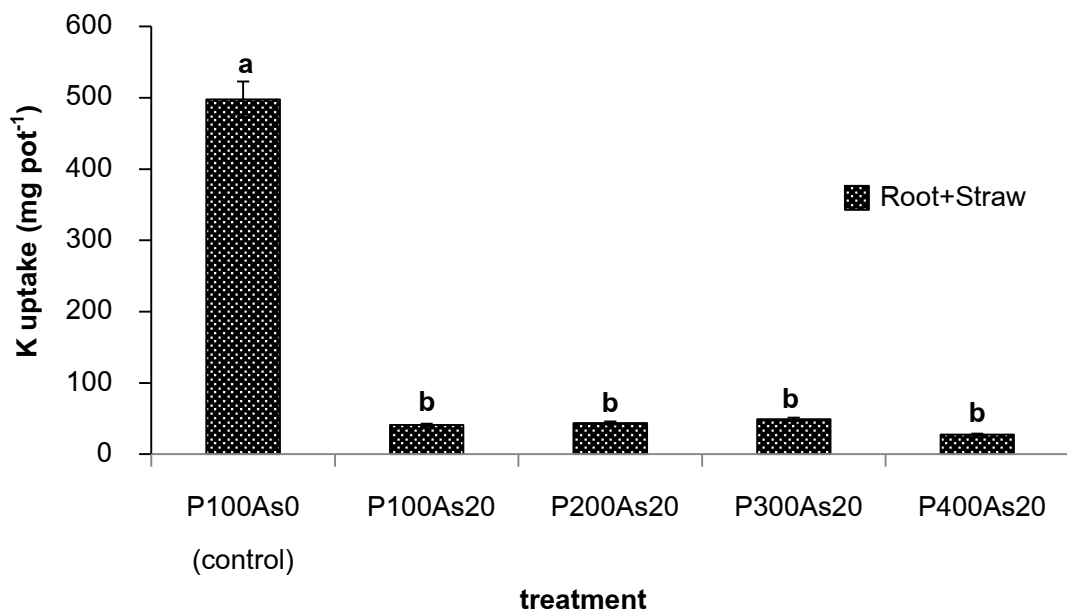
ภาพที่ 3.10 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้ไนโตรเจนในราก+ตอซัง

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05



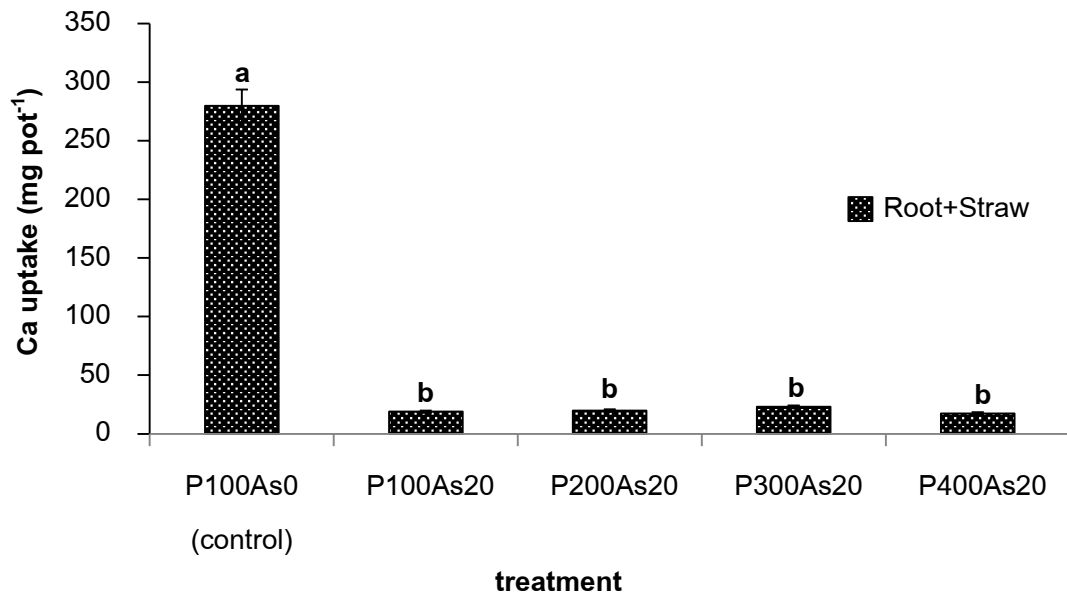
ภาพที่ 3.11 ผลของทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้ฟอสฟอรัสในราก+ตอซัง

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ $P=0.05$



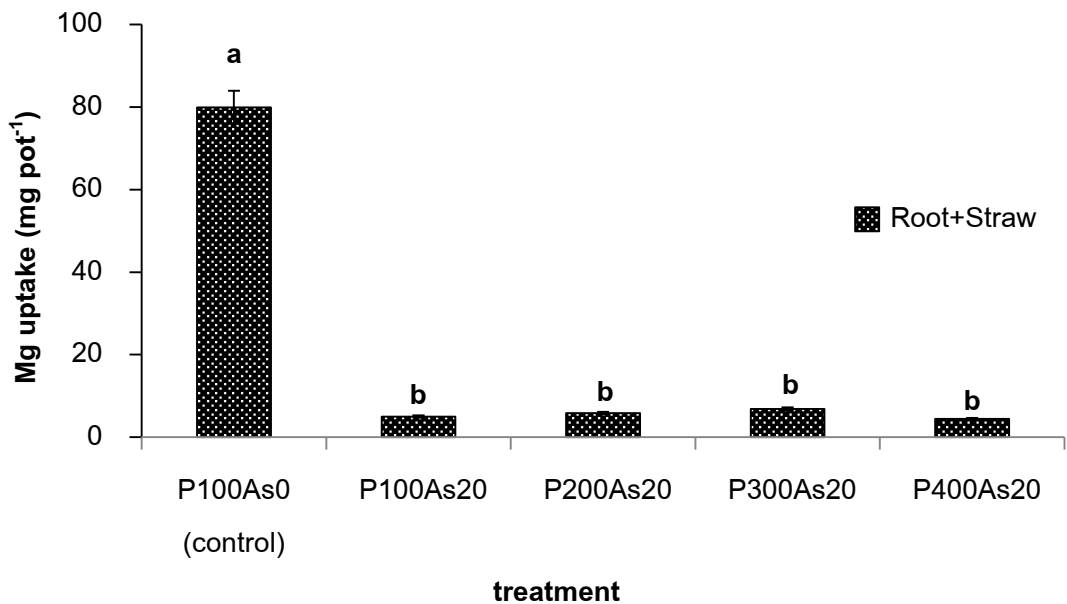
ภาพที่ 3.12 ผลของทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้โพแทสเซียมในราก+ตอซัง

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ $P=0.05$



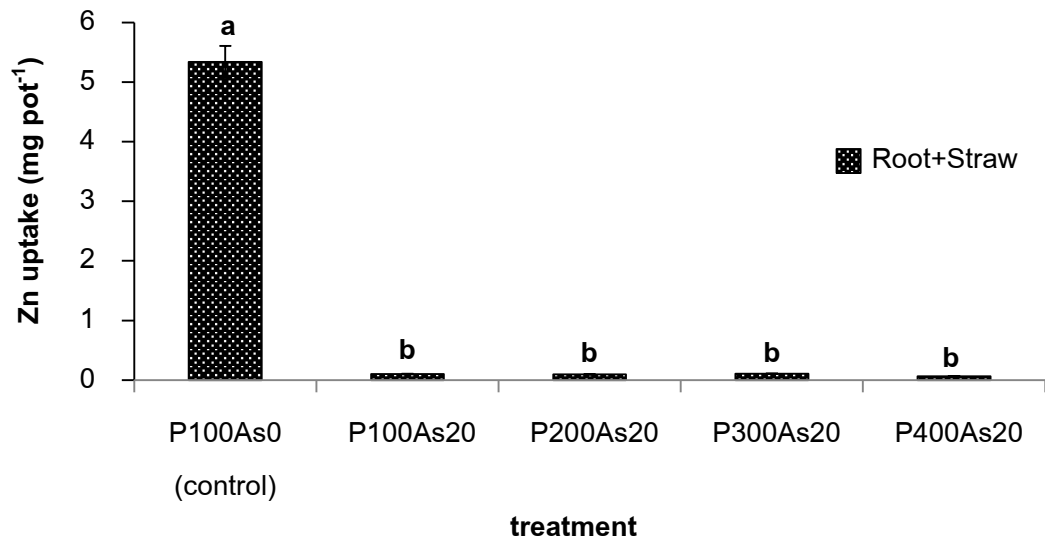
ภาพที่ 3.13 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้แคลเซียมในราก+ตอซัง

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05



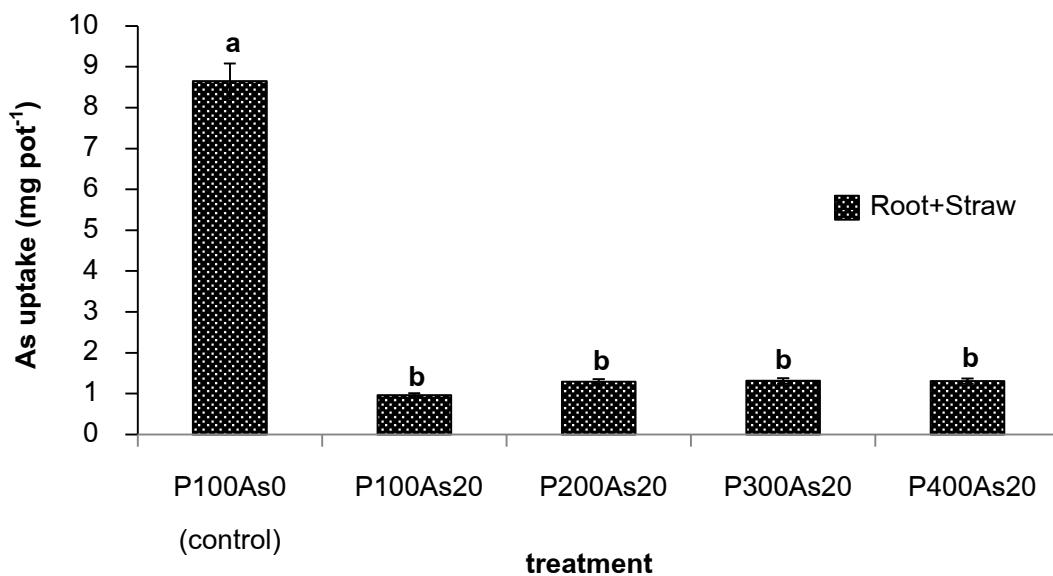
ภาพที่ 3.14 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้แมกนีเซียมในราก+ตอซัง

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05



ภาพที่ 3.15 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้สังกะสีในราก+ตอซัง

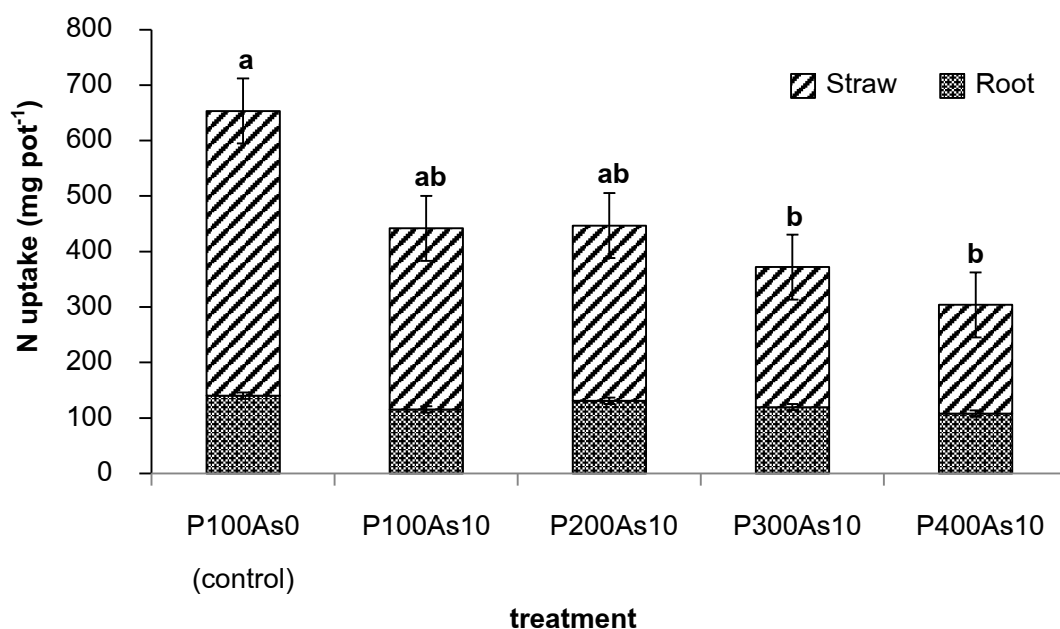
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05



ภาพที่ 3.16 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้สารหนูในราก+ตอซัง

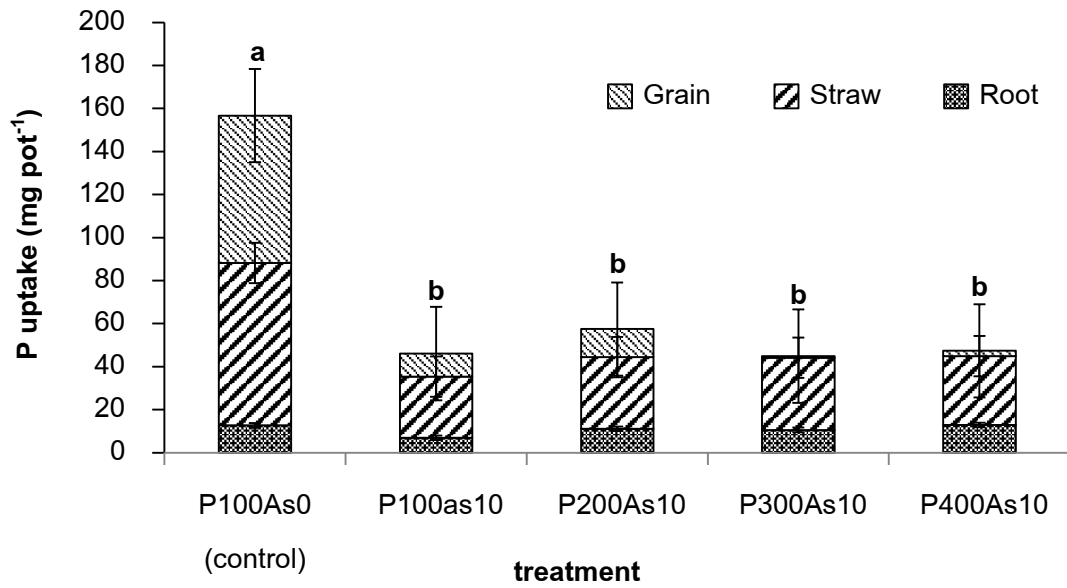
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

ข้าวที่ปลูกในตำรับการทดลองที่ใส่สารหนู 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การดูดใช้ธาตุไนโตรเจนในรากและตอซังลดลง ส่วนการดูดใช้ธาตุต่าง ๆ ในราก ตอซัง และเมล็ด พบว่าการดูดใช้ธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และสังกะสีลดลง แต่การดูดใช้สารหนูไม่มีความแตกต่างทางสถิติในเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม อย่างไรก็ตาม ตำรับการทดลองที่ใส่ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตเพิ่มขึ้น (100, 200, 300 และ 400 mg P₂O₅ kg⁻¹) ร่วมกับการใส่สารหนู 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การดูดใช้ธาตุไนโตรเจนในรากและตอซังมีแนวโน้มลดลง ส่วนการดูดใช้ธาตุต่าง ๆ ในราก ตอซัง และเมล็ด พบว่าการดูดใช้ธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และสังกะสี และสารหนู ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ภาพที่ 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23)

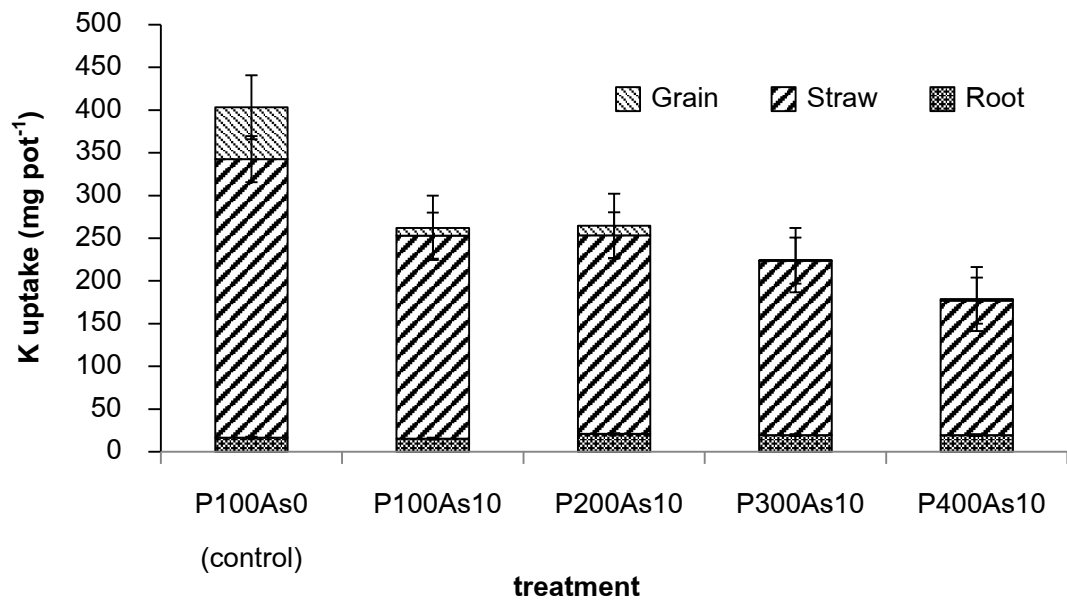


ภาพที่ 3.17 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้ในโตรเจนในรากและตอซัง

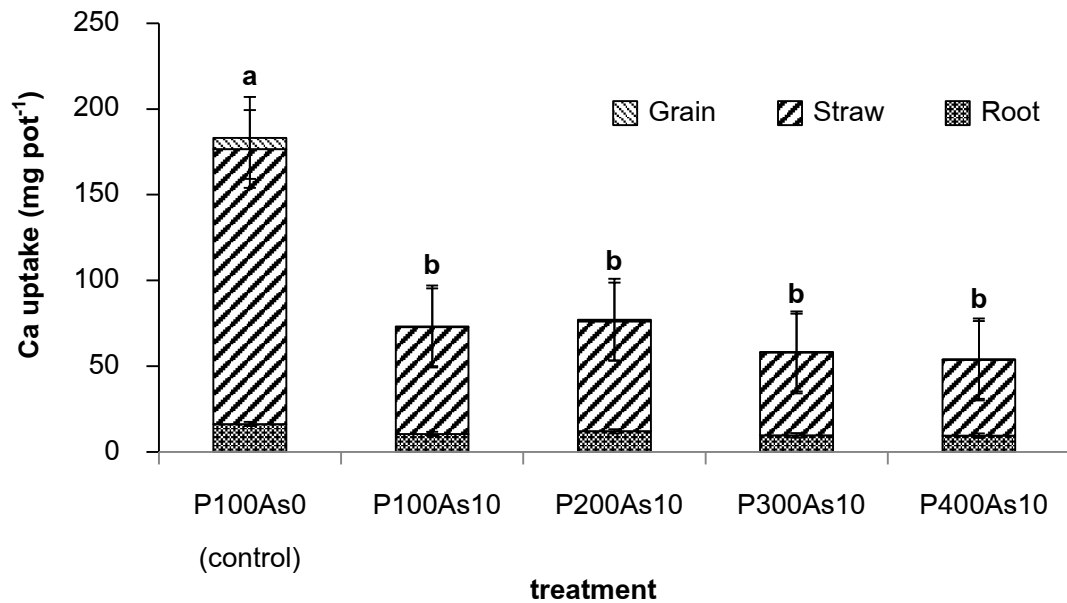
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05



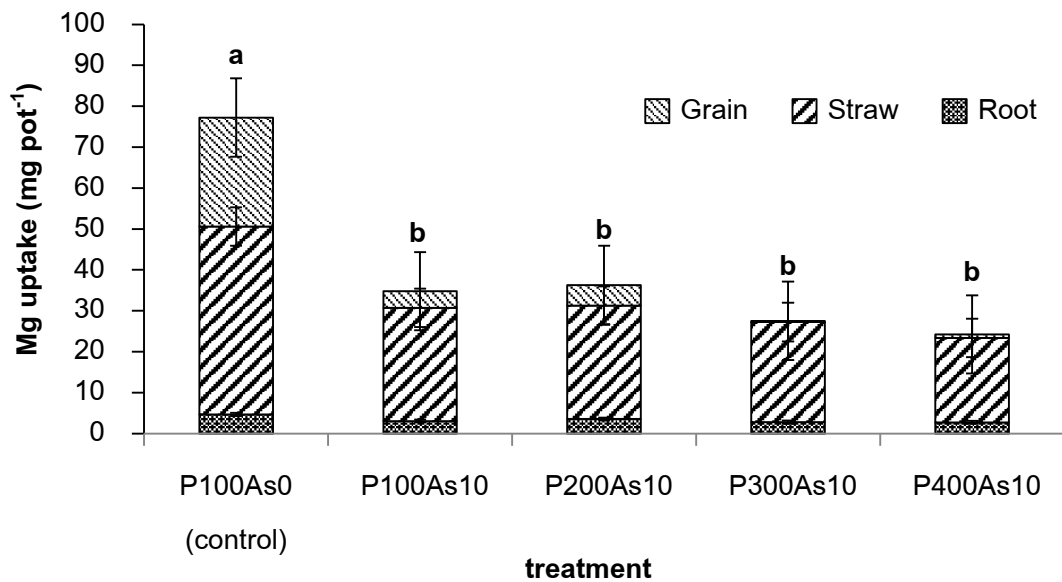
ภาพที่ 3.18 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้ฟอสฟอรัสในราก ตอซัง และเมล็ด
 หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT
 ที่ $P=0.05$



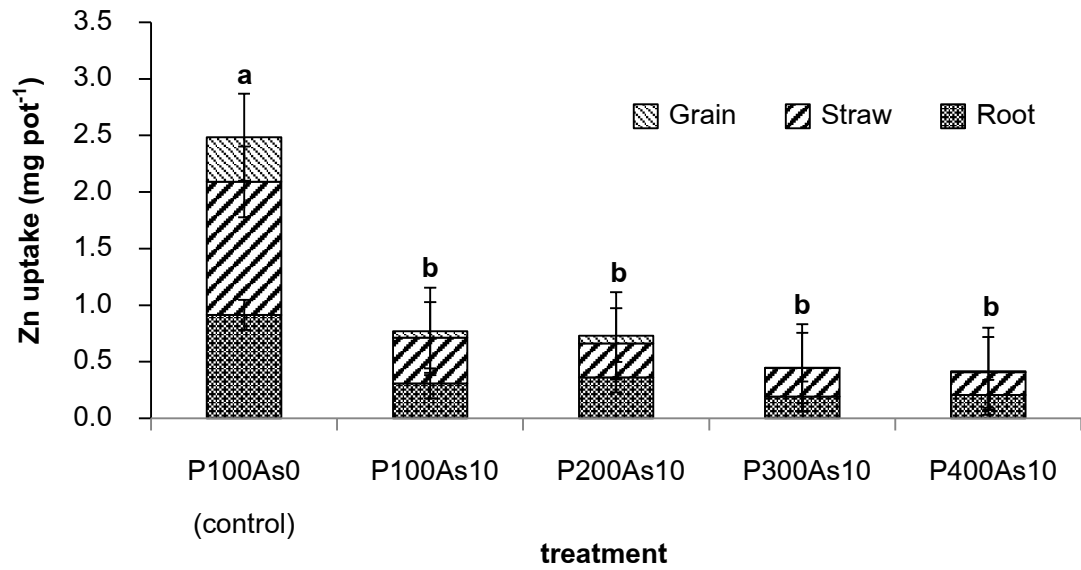
ภาพที่ 3.19 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้โพแทสเซียมในราก ตอซัง และเมล็ด
 หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT
 ที่ $P=0.05$



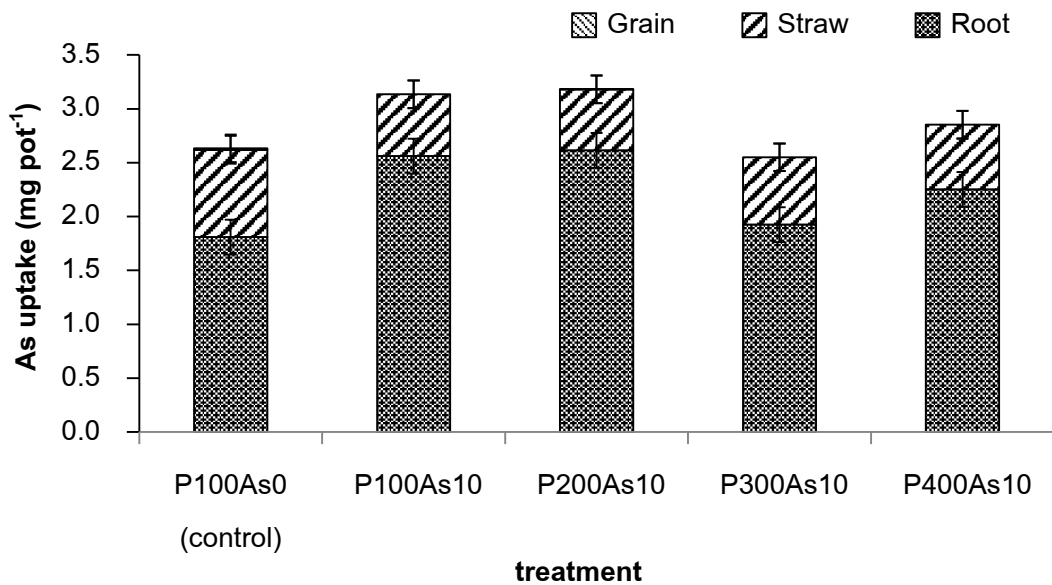
ภาพที่ 3.20 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้แคลเซียมในราก ตอซัง และเมล็ด
 หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT
 ที่ $P=0.05$



ภาพที่ 3.21 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้แมกนีเซียมในราก ตอซัง และเมล็ด
 หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT
 ที่ $P=0.05$

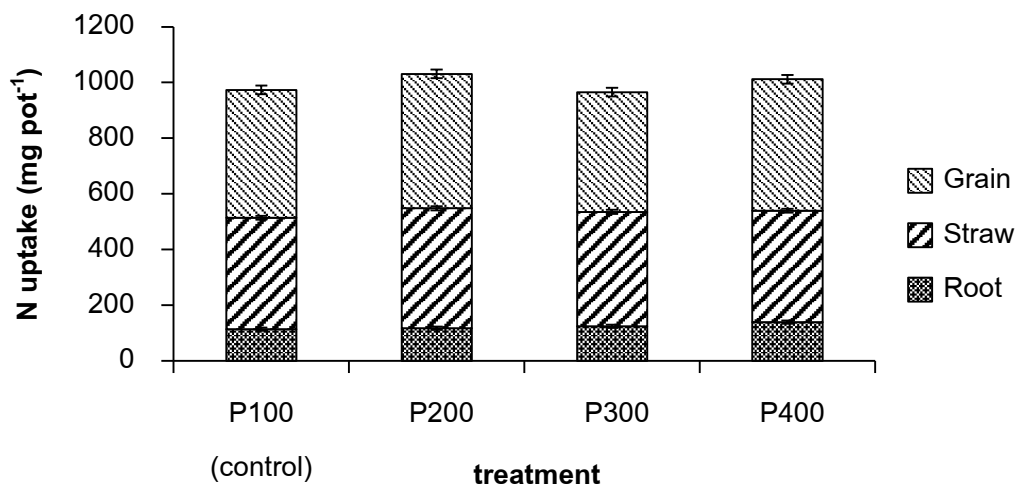


ภาพที่ 3.22 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้สังกะสีในราก ตอซัง และเมล็ด
 หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT
 ที่ $P=0.05$

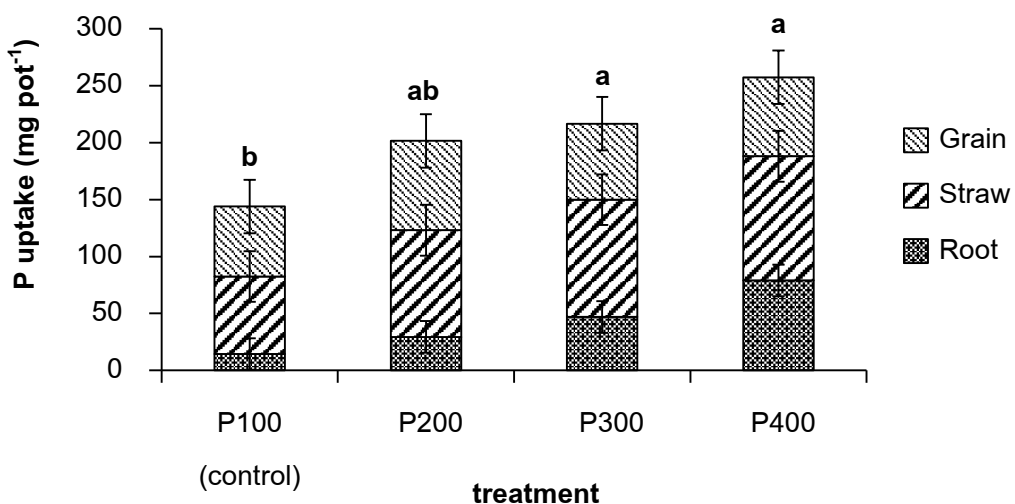


ภาพที่ 3.23 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้สารหนูในราก ตอซัง และเมล็ด
 หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT
 ที่ $P=0.05$

ข้าวที่ปลูกในดำรับการทดลองที่ใส่สัทธิบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตเพิ่มขึ้น (100, 200, 300 และ 400 mg P₂O₅ kg⁻¹) แต่ไม่ใส่สารหนู การดูดใช้ธาตุต่างๆ ในราก ตอซัง และ เมล็ด พบว่า การดูดใช้ธาตุไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม สังกะสี และสารหนู ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ แต่การดูดใช้ธาตุฟอสฟอรัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 3.24, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30)

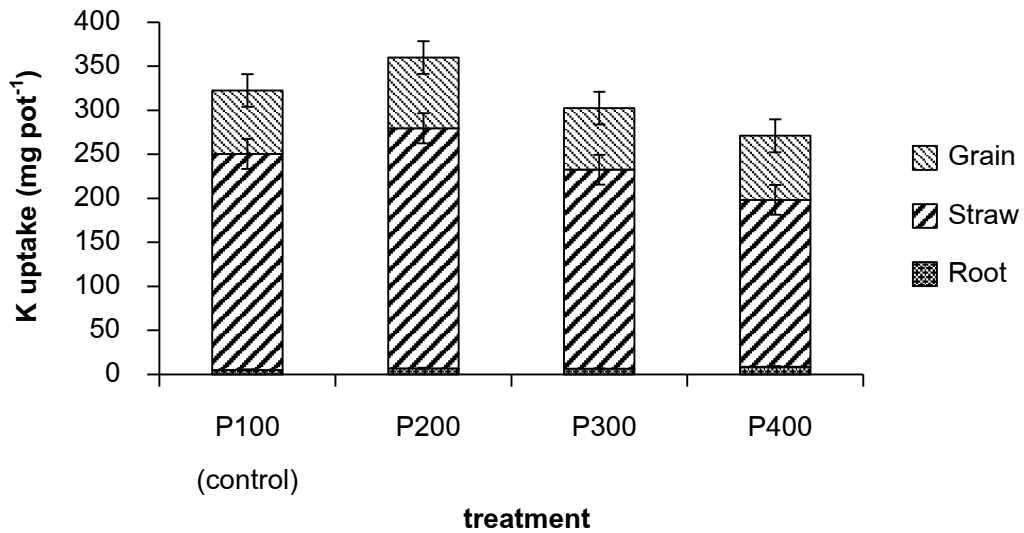


ภาพที่ 3.24 ผลของทธิบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้ในโตรเจนในราก ตอซัง และเมล็ด
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

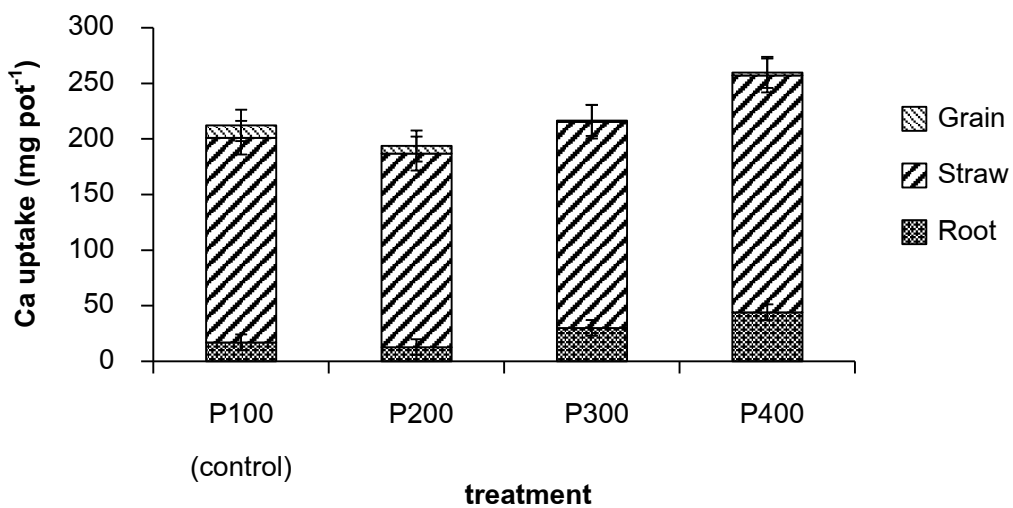


ภาพที่ 3.25 ผลของทธิบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้ฟอสฟอรัสในราก ตอซัง และเมล็ด

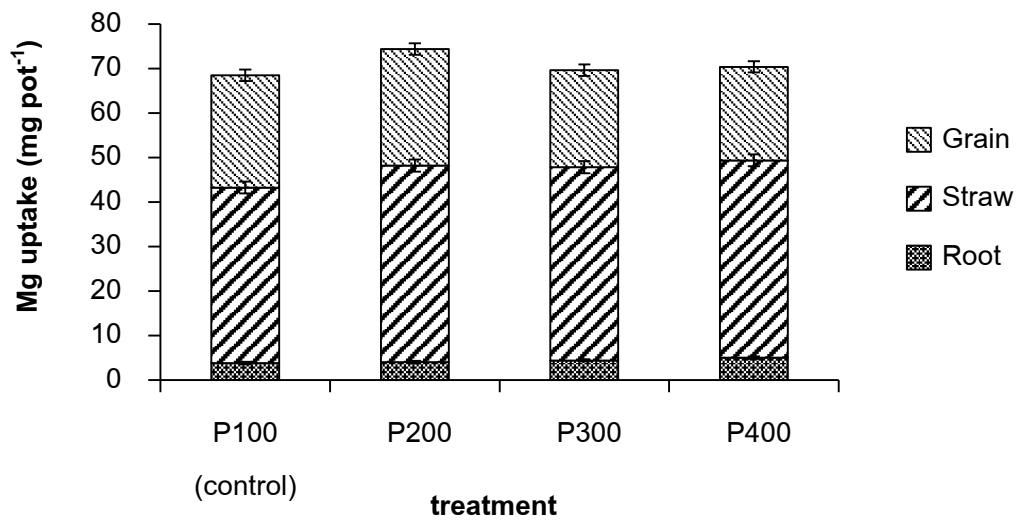
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ $P=0.05$



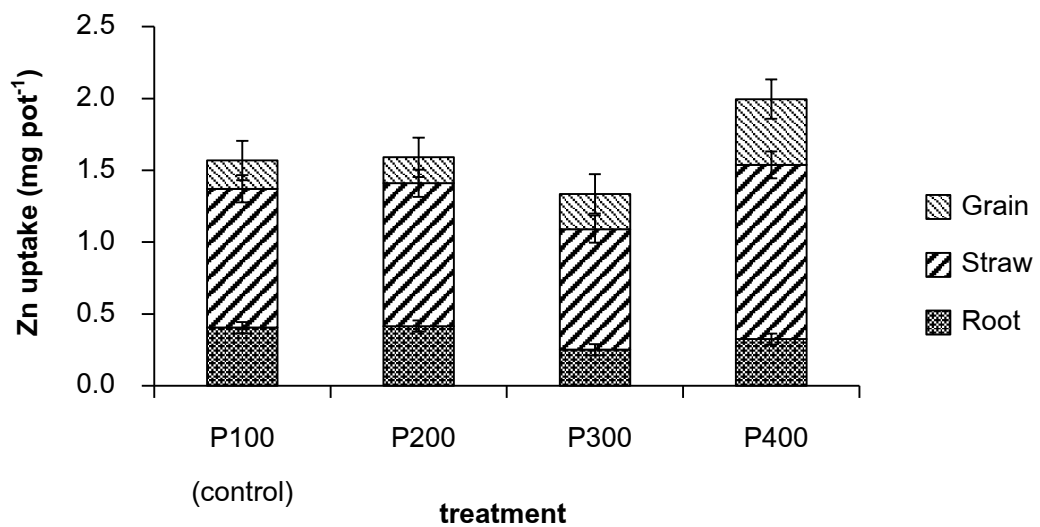
ภาพที่ 3.26 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้โพแทสเซียมในราก ตอซัง และเมล็ด
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ $P=0.05$



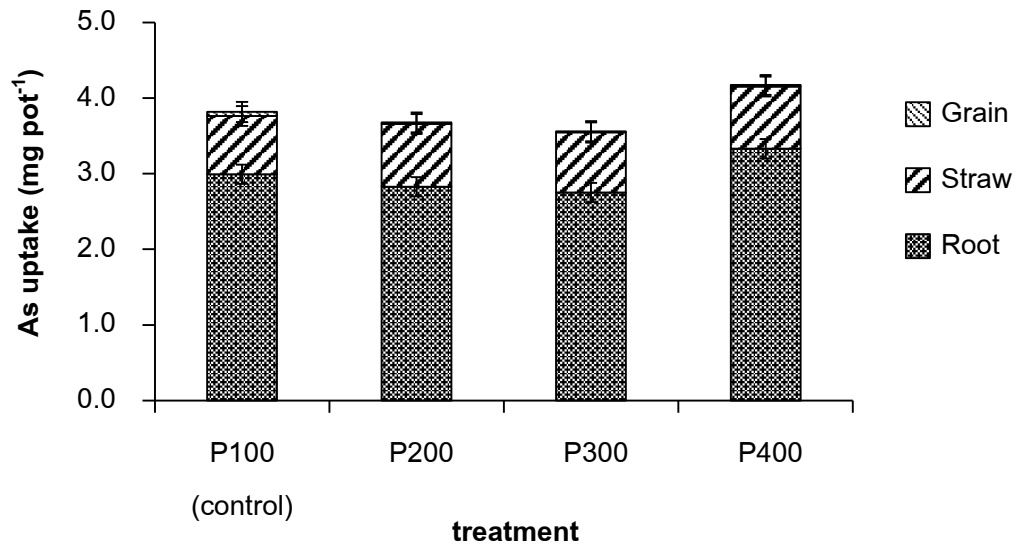
ภาพที่ 3.27 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้แคลเซียมในราก ตอซัง และเมล็ด
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ $P=0.05$



ภาพที่ 3.28 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้แมกนีเซียมในราก ตอซัง และเมล็ด
 หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT
 ที่ $P=0.05$



ภาพที่ 3.29 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้สังกะสีในราก ตอซัง และเมล็ด
 หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT
 ที่ $P=0.05$



ภาพที่ 3.30 ผลของทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการดูดใช้สารหนูในราก ตอซัง และเมล็ด
 หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT
 ที่ $P=0.05$

บทที่ 4

วิจารณ์ผลการทดลอง

การวิจารณ์ผลการทดลองนี้ประกอบด้วยสถานะสารหนูและสมบัติของดินที่ปนเปื้อนสารหนูจากอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช และผลของการใช้ทริบิเปิลซูเปอร์-ฟอสเฟตลดความเป็นพิษของสารหนูในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1

1. สถานะสารหนูและสมบัติของดินที่ปนเปื้อนสารหนูจากอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช

1.1 สารหนูสถานะสารหนูและรูปของสารหนูในดินจากอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช

บริเวณอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราชเป็นพื้นที่ที่เคยมีการทำเหมืองแร่ดีบุก ทำให้สารหนูปนเปื้อนอยู่ทั่วไปในดินบริเวณพื้นที่ที่ศึกษา ซึ่งเป็นบริเวณที่มีแร่อาร์ซีโนไฟไรต์ (ประกอบด้วย เหล็ก 34.3% สารหนู 40.0% และกำมะถัน 19.7%) แร่นี้ส่วนมากจะอยู่ในหินและในสายแร่ดีบุก วุลแฟรม เกิดการสลายตัวตามธรรมชาติและเกิดจากการทำเหมืองแร่ทำให้สารหนูมีโอกาสปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม (พืงใจ, 2531) จากการศึกษาครั้งนี้พบสารหนูทั้งหมดในดินบนและดินล่างสูง อยู่ในช่วง 173.4–426.5 และ 129.9–383.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 3.2) ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ คือ 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (WHO, 1981) ประเทศไทยกำหนดระดับสารหนูทั้งหมดในดินทำการเกษตรไม่เกิน 3.90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2547) แต่พบว่า บริเวณพื้นที่ดังกล่าวสารหนูทั้งหมดในดินมีแนวโน้มลดลงจาก 27 ปีที่ผ่านมา ซึ่งเคยพบสารหนูทั้งหมดในตัวอย่างดินอยู่ในช่วง 50–5,300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (อารีย์, 2534)

ที่ผ่านมาการวิเคราะห์สารหนูในดินส่วนใหญ่จะวิเคราะห์ในรูปสารหนูทั้งหมด ซึ่งสะท้อนส่วนที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมไม่ดีนัก เนื่องจากสารหนูในรูปที่มีศักยภาพในการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมนั้นไม่ได้มีผลจากสารหนูทุกรูปเพราะสารหนูสามารถอยู่ในรูปทางธรณีเคมี (geochemical form) เช่น รูปออกไซด์ที่เสถียร ยากต่อการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม (Sarkar and Datta, 2004) ดังนั้นจึงวิเคราะห์สารหนูรูปต่าง ๆ พบสารหนูในรูป F3 มากที่สุด (ภาพที่ 3.3) เป็นสารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์อสังฐาน เกิดในสภาวะออกซิเดชันในสภาพแวดล้อมเป็นด่างหรือเป็นกลาง สารประกอบอาร์เซนเนตจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยการตกตะกอนร่วมกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ (Wilson and Hawkins, 1978) รองลงมา คือ

F4 (ภาพที่ 3.3) เป็นสารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผลึก ซึ่งเป็นสารหนูส่วนที่ตรงกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์โดยถูกยึดไว้ด้วยแรงที่เหนียวแน่น เมื่อเวลาผ่านไปจะเปลี่ยนไปเป็นสารมีผลึก (Wang *et al.*, 2015; Lock *et al.*, 2018) สารหนูทั้งสองรูปนี้ไม่สามารถปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายหรือปลดปล่อยออกมาน้อยมาก (Sarkar and Datta, 2004) สอดคล้องกับรายงานของ Hoang and Hahn (2015) พบว่า ดินบน (0–15 cm) บริเวณสามเหลี่ยมปากแม่น้ำแดง ประเทศเวียดนาม สารหนูส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์อสัณฐานและที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผลึก เนื่องจากดินมีเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์สูง

สารหนูรูปที่พบน้อยแต่เป็นรูปที่มีศักยภาพจะปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ คือ สารหนูรูป F1 ค่าที่ได้อยู่ในช่วง 0.18–5.22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 3.3) เป็นสารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจง ถูกดูดซับบนผิวของคอลลอยด์ การดูดซับมักเกิดกับไอออนที่มีโมเลกุลของน้ำล้อมไว้โดยรอบ และเกิดจากแรงดึงดูดแบบคูอมบ์เนื่องจากประจุไฟฟ้าต่างกัน โดยสารหนูดังกล่าวทำปฏิกิริยาเป็นไอออนเชิงซ้อนที่ผิวชั้นนอก (outer-sphere complex) หรือ แอนไอออนที่อยู่ในชั้นแพร่กระจาย (diffuse layer) สารหนูเหล่านี้จะสามารถแลกเปลี่ยนได้ง่ายกับแอนไอออนอื่น ๆ ในสารละลายรอบนอก (Wenzel *et al.*, 2001; Gleyzes *et al.*, 2002) ส่วนสารหนูรูป F2 ค่าที่ได้อยู่ในช่วง 22.13–45.82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 3.3) เป็นสารหนูที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง ถูกดูดซับที่ผิวชั้นใน (inner-sphere complex) ซึ่งการดูดซับแบบนี้ไม่ได้เกิดตรงตำแหน่งที่มีประจุบวกของคอลลอยด์ ปริมาณแอนไอออนที่ถูกดูดซับไม่จำเป็นต้องมีสมมูลเท่ากับประจุบวกบนผิวคอลลอยด์ การดูดซับแบบเฉพาะเจาะจงมักเกิดกับออกซีแอนไอออน (oxyanion) (AsO_3^{3-} , AsO_4^{3-}) ซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange) ระหว่างแอนไอออนกับหมู่ฟังก์ชันด้วยแรงดูดยึดที่เหนียวแน่นมากยิ่งขึ้นบนผิวของคอลลอยด์ ดิน (Wenzel *et al.*, 2001) ซึ่งพบว่า ปริมาณสารหนูทั้งสองรูปนี้มีค่าสูงกว่าค่าระดับความเป็นพิษของสารหนูทั้งหมดที่กำหนดในดินทำการเกษตรในประเทศไทย (3.90 mg kg^{-1}) ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ปริมาณสารหนูในรูปที่มีศักยภาพในการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม (F1+F2) ในอำเภอรอนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช มีปริมาณสูงกว่าที่กำหนดในประเทศ

เมื่อนำสารหนูรูปต่าง ๆ มาหาความสัมพันธ์ พบความสัมพันธ์ระหว่างสารหนูรูป F2 กับ F1+F2 แสดงว่าสารหนูที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจงสามารถที่จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารหนูแบบไม่เฉพาะเจาะจงได้เมื่อรูปสารหนูแบบไม่เฉพาะเจาะจงในดินลดลง (Zhang and Sparks, 1990 อ้างโดย Wang *et al.*, 2015) นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างสารหนูรูป F2 กับ F3 แสดงว่าสารหนูที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจงสามารถที่จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์อสัณฐานได้เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น (Tang *et al.*, 2007) และความสัมพันธ์ระหว่างสารหนูรูป F4 กับ F5 แสดงว่าสารหนูที่

เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผลึกสามารถที่จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารหนู ส่วนที่เหลือได้ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Wang *et al.* (2015) ได้หาความสัมพันธ์ระหว่าง สารหนูรูปต่าง ๆ ในดินเพาะปลูกพืช ความลึก 0–20 เซนติเมตร จำนวน 40 ตัวอย่าง ในมณฑล หูหนาน สาธารณรัฐประชาชนจีน พบว่า พบสารหนูรูป F1 และ F2 มีความสัมพันธ์กับสารหนู รูป F1+F2 ($r = 0.79, P < 0.01$ และ $r = 0.73, P < 0.01$) สารหนูรูป F3 มีความสัมพันธ์กับรูป F4 ($r = 0.64, P < 0.01$) และสารหนูรูป F4 มีความสัมพันธ์กับรูป F5 ($r = 0.66, P < 0.01$)

1.2 อิทธิพลของสมบัติของดินต่อรูปของสารหนูในดิน

สมบัติของดินเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อรูปของสารหนูที่จะสะสมและถูก ปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม (Wang *et al.*, 2015) จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า สารหนูรูป F1 และ F2 มีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุ (ตารางที่ 3.3) เนื่องจากโมเลกุลของอินทรีย์วัตถุ ในดินมีประจุบวกอยู่บางส่วนทำให้มีความสามารถในการดูดซับแอนไอออนได้ ส่วนประจุบวก ดังกล่าวมักเกิดขึ้นจากกระบวนการเติมโปรตอน (protonation) ของ amine group บนอนุภาค อินทรีย์วัตถุซึ่งในสภาวะที่ดินเป็นกรดทำให้เกิดประจุบวกได้ดีจึงส่งผลให้สารหนูจับตัวกับ อินทรีย์วัตถุได้ดี (Meharg, 2004) และในอินทรีย์วัตถุมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ (Havlin *et al.*, 2005) ทำให้สารหนูรูป F1 และ F2 มีความสัมพันธ์กับไนโตรเจน ทั้งหมดด้วย และยังพบสารหนูรูป F1 และ F2 มีความสัมพันธ์กับฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (ตารางที่ 3.3) เนื่องจากในอินทรีย์วัตถุมีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ (จำเป็น, 2557) และในสภาวะเป็นกรดเล็กน้อยพฤติกรรมของสารหนูจะคล้ายกับฟอสเฟต และ ไอออนทั้งสองจะถูกดูดซับอย่างเหนียวแน่นบนพื้นผิวของดินเหนียวและออกไซด์ของเหล็กและ อะลูมิเนียม (O'Neill, 1990 อ้างโดย Alam *et al.*, 2003) ซึ่งการดูดซับของฟอสเฟตเกิดจาก ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange) ระหว่างออกซิแอนไอออนในสารละลายกับ หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของแร่หรือคอลลอยด์ดิน เช่น แร่เหล็กออกไซด์ การแลกเปลี่ยนลิแกนด์ ดังกล่าวมีผลทำให้เกิดการดูดซับแอนไอออนเชิงซ้อนที่ผิวชั้นใน (inner-sphere surface complexes) (Goh and Lim, 2004) นอกจากนี้สารหนูรูป F4 มีความสัมพันธ์กับเหล็กออกไซด์ ที่เป็นผลึก เนื่องจากดินที่เก็บมาเป็นดินอันดับอัลทิซอลส์ จะมีออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม มาก ทำให้สารหนูถูกดูดซับและตกตะกอนในรูปนี้ สอดคล้องกับการทดลองของ Novoa-Munoz *et al.* (2007) ที่พบว่า สารหนูรูปที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผลึกมี ความสัมพันธ์กับเหล็กออกไซด์ที่เป็นผลึกและอะลูมิเนียมที่สกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ สอดคล้องกับศึกษารูปของสารหนูในดินที่ได้รับผลกระทบจากการทำเหมือง Aznalcollar ยืนยัน ว่าอิทธิพลของสารประกอบอะลูมิเนียมและเหล็กมีผลต่อการแพร่กระจายของสารหนูในดิน (Taggart *et al.*, 2004) ส่วนสารหนูรูป F5 มีความสัมพันธ์กับเหล็กออกไซด์ออสฐานและที่เป็น

ผลึก สอดคล้องกับการทดลองของ Novoa-Munoz และคณะ (2007) ที่พบว่า สารหนูในส่วนที่เหลือมีความสัมพันธ์กับเหล็กออกไซด์ที่เป็นผลึกและอะลูมิเนียมที่สกัดด้วยโซเดียมไดไทโอไนต์ซีเทรตซึ่งอะลูมิเนียมดังกล่าวสัมพันธ์กับเหล็กออกไซด์ในดิน

1.3 อิทธิพลของระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูต่อรูปของสารหนูในดิน

มีรายงานว่าระยะใกล้แหล่งกำเนิดสารหนูพบสารหนูทั้งหมดสูงกว่าระยะไกล (Garcia-Sanchez and Alvarez-Ayuso, 2003; Otones *et al.*, 2011) จึงศึกษาการแพร่กระจายของสารหนูทั้งหมดในดินบนและดินล่างจากแหล่งกำเนิดสารหนู (ระยะห่าง 0.5–6 km) พบว่าพื้นที่ที่อยู่ถัดลงมาใกล้ ๆ แหล่งกำเนิดสารหนูมีแนวโน้มการสะสมของสารหนูทั้งหมดในดินสูง และสารหนูทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูเพิ่มขึ้น ดินบริเวณใกล้ ๆ แหล่งแร่ที่มีสารหนูปะปนอยู่มีปริมาณสารหนูทั้งหมดอยู่มากในดินชั้นล่าง (ภาพที่ 3.4B) เนื่องจากดินชั้นล่างบริเวณใกล้ ๆ แหล่งแร่ที่ระยะห่าง 1 กิโลเมตร มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูง และพบสารหนูทั้งหมดในดินบนมากที่สุดที่ระยะห่าง 1–2 กิโลเมตร (ภาพที่ 3.4A) เนื่องจากสารหนูทั้งหมดสะสมอยู่ชั้นดินบนมากกว่าปกติเพราะถูกดูดซับโดยอินทรีย์วัตถุ (ชมลวรรณ, 2551) และจากรายงานของ ฟิงใจ (2531) ได้ศึกษาปัญหาของสารหนูในพื้นที่บริเวณนี้ พบว่า ปริมาณสารหนูทั้งหมดในดินและตะกอนท้องน้ำมีมากในบริเวณเทือกเขาร่อนนาและโรงแต่งแร่ ปริมาณสารหนูทั้งหมดลดลงเมื่อห่างจากเทือกเขาร่อนนาตามระยะทางของกระแสน้ำในลำห้วย นอกจากนี้พบว่า สารหนู F1 และ F2 (สารหนูในรูปที่มีศักยภาพในการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม) ลดลงเมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.3) สอดคล้องกับการศึกษาสารหนูรูปต่าง ๆ พบว่า รูปสารหนูที่สกัดได้ในขั้นตอนการสกัดที่ 1–3 ซึ่งเป็นรูปที่สามารถเคลื่อนย้ายและปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมลดลงเมื่อไกลจากแหล่งกำเนิด (Otones *et al.*, 2011; Alvarez-Ayuso *et al.*, 2016)

2. ผลของทริบิเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตลดความเป็นพิษของสารหนูในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1

2.1 สมบัติของดินก่อนและหลังปลูกข้าว

ดินที่ใช้ในการทดลองนั้น คือ ชุดดินโคกเคียน (Ko) (Fine-loamy, kaolinitic, ishyperthermic Typic Kandiaquults) จากดินนา ซึ่งจัดอยู่ในอันดับอัลติซอลส์ (Ultisols) เป็นดินมีสภาพเป็นกรดจัด (pH 5.54) และมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ (ตารางที่ 3.4) ดินมีอินทรีย์วัตถุอยู่ในช่วง 1–2 เปอร์เซ็นต์ (ปานกลาง) ฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 5–10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ปานกลาง) และโพแทสเซียม <60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ต่ำ) ดังนั้นต้องใส่ปุ๋ยมากขึ้นเพื่อเพิ่มความ

อุดมสมบูรณ์ของดิน ซึ่งคำแนะนำการใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินสำหรับข้าวของกรมวิชาการเกษตร (2548) พันธุ์ข้าวไม่ไวต่อช่วงแสง ใช้ปุ๋ย N, P₂O₅ และ K₂O เท่ากับ 12, 3 และ 6 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ดินที่เหมาะสมสำหรับปลูกข้าวมีสภาพเป็นกรดจัดถึงกรดเล็กน้อย (5.0–6.5) (Hazelton and Murphy, 2007) ดังนั้น ดินที่มีสภาพเป็นกรดรุนแรงจะทำให้สารประกอบอาร์เซนเนตสามารถละลายน้ำได้ดี (Marin *et al.*, 1993) นอกจากนี้สารหนูทั้งหมดในดินนา เท่ากับ 10.53 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานที่ประเทศไทยกำหนดระดับสารหนูทั้งหมดในดินทำการเกษตรไม่เกิน 3.90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2547)

ดินหลังสิ้นสุดการทดลองมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.5, 3.6 และ 3.7) เนื่องจากดินที่มีสภาพเป็นกรด (pH>5.0) เมื่อมีการขังน้ำค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก เป็นผลเนื่องมาจากการรีดักชันของสารต่างๆ ในดิน เช่น NO₃⁻, MnO₂ และ Fe(OH)₃ การรีดักชันของสารต่าง ๆ จะใช้ H⁺ รวมในปฏิกิริยาเป็นปริมาณที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับ การรับอิเล็กตรอน โดยเฉพาะการรีดักชันของ Fe(OH)₃ ต้องใช้โปรตอนถึงสามเท่าของอิเล็กตรอน จึงทำให้ H⁺ จากสารละลายถูกนำไปใช้ไปเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินสูงขึ้น และมีการปลดปล่อย Fe²⁺ และ Mn²⁺ ออกมาในสารละลายจำนวนมาก ในระยะหลังของการขังน้ำค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากและมีค่าค่อนข้างคงที่ใกล้ 7.0 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการตกตะกอนของ Fe²⁺ และ Mn²⁺ (ไพบูลย์, 2546) และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟอสฟอรัสที่ใส่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.5, 3.6 และ 3.7) นอกจากนี้ในสภาพขังน้ำเฟอริกฟอสเฟตจะถูกกรดให้กลายเป็นเฟอรัสฟอสเฟตซึ่งละลายน้ำได้ง่าย (Ponnamperumal, 1972 อ้างโดย ไพบูลย์, 2546) และการตรึงฟอสฟอรัสในดินจะต่ำที่สุดเมื่อดินมีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 6.0–7.0 (ยงยุทธ และคณะ, 2551)

2.2 อาการเป็นพิษของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนสารหนู

ความเข้มข้นของสารหนูเพิ่มขึ้นส่งผลให้ข้าวแสดงอาการเป็นพิษของสารหนูมากขึ้น เมื่อใส่สารหนู 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ข้าวเริ่มแสดงอาการเป็นพิษจากสารหนูในช่วงระยะแตกกอ ทำให้ต้นข้าวชะงักการเจริญเติบโต ลำต้นแคระแกรน แตกกอน้อย ขอบใบม้วนเข้าหากัน หลังจากนั้นใบข้าวหงิกงอและแห้ง รากสั้นและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลดำ ต้นข้าวตายก่อนถึงระยะเก็บเกี่ยว (ภาพที่ 3.7) ซึ่งลักษณะอาการเป็นพิษของสารหนูจะรุนแรงมากกว่าใส่สารหนู 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งข้าวเริ่มแสดงอาการเป็นพิษจากสารหนูในช่วงระยะสร้างช่อดอกอ่อนของข้าว โดยเริ่มแสดงอาการที่ใบล่างก่อน ปลายใบเริ่มมีสีแดง แผ่นใบเหลือง และขยายไปสู่เส้นกลางใบ การผลิตดอกออกร่วงลดลง เมล็ดข้าวลีบ (ภาพที่ 3.8) โดยสารหนูจะเข้าไปทำลาย

เนื้อเยื่อของพืชโดยเฉพาะใบอ่อน ยอดอ่อน หรือลำต้น เนื่องจากสารหนูที่พืชดูดซับเข้าไปผ่านทางรากจะไปรบกวนกระบวนการเมตาบอลิซึมต่าง ๆ ในเซลล์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช (Abedin and Meharg, 2002) จากรายงานวิจัยอื่น ๆ เช่น ผักกูดมีการสะสมสารหนูไว้ในส่วนของใบมากกว่าราก ปริมาณของสารหนูสะสมในใบสูงถึง 1,373 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การเจริญเติบโตลดลง ใบเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและหงิกงอ ยอดอ่อนแห้งตาย และรากเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล (หัทธยา, 2547) ต้นกล้าข้าวปลายใบล่างมีสีแดงและเหลือง ขยายไปสู่เส้นกลางใบ หลังจากนั้นใบข้าวหงิกงอและแห้ง ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนู 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Te, 2017)

2.3 การใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวที่ปลูกในดินปนเปื้อนสารหนู

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของข้าว (เนตรนภา และคณะ, 2561) จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า การใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตในดินที่มีสารหนูสูง (10 และ 20 mg kg⁻¹) ทำให้การเจริญเติบโตของส่วนเหนือดินและน้ำหนักแห้งของชีวมวล (biomass) มีแนวโน้มลดลง (ตารางที่ 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 และ 3.13) สอดคล้องกับการศึกษาในข้าว พบว่า จำนวนกอและผลผลิตเมล็ดข้าวลดลงเมื่อมีการใส่ฟอสเฟตเพิ่มขึ้น (Islam and Jahiruddin, 2010; Hossain *et al.*, 2009) เนื่องจากฟอสเฟตสามารถไล่ที่สารหนูที่ถูกดูดซับจากสารประกอบต่าง ๆ ของดินได้ จึงสามารถเพิ่มปริมาณสารหนูในดิน สารหนูในรูปแอนไอออน เช่น AsO₄³⁻ จะถูกดูดซับโดยไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม อาจถูกแทนที่ได้ด้วยฟอสเฟต โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนแอนไอออน (anion exchange) (ศุภมาศ และคณะ, 2559) ส่งผลให้สารหนูในส่วนที่พืชดูดกินได้เพิ่มขึ้น จึงทำให้ยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช (Davenport and Peryea, 1991) แต่ในขณะเดียวกัน การใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตในดินที่มีสารหนูต่ำมีแนวโน้มการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นและผลผลิตเพิ่มขึ้น 1,423 กิโลกรัมต่อไร่ โดยเฉพาะใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 200 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม (ตารางที่ 3.14, 3.15 และ 3.16) เนื่องจากอาร์เซนิตสามารถเข้าสู่เซลล์รากโดยช่องทางเดียวกับฟอสเฟต (Zhao *et al.*, 2008) และฟอสเฟตกับอาร์เซนิตยังมีการแข่งขันกันสูงทางกระบวนการทางชีวเคมี (biochemical process) (Meharg, 2005) อาจเป็นผลให้ฟอสฟอตในสารละลายดินสามารถยับยั้งการดูดใช้สารหนูในพืชได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Te (2017) พบว่า ความสูงจำนวนกอ น้ำหนักแห้งของตอซัง ราก และผลผลิตเมล็ดของข้าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 200 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม และยังสอดคล้องกับการทดลองของนักวิจัยอื่นๆ เช่น ต้นกล้าข้าว (Choudhury *et al.*, 2011) ข้าว (Pigna *et al.*, 2010) และข้าวสาลี (Cozzolino *et al.*, 2010)

2.4 การใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตต่อความเข้มข้นและการดูดใช้สารหนูและธาตุอาหารในข้าว

จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า ความเข้มข้นของสารหนูในรากและตอซึ่งมีแนวโน้มลดลง เมื่อใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 200 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ร่วมกับสารหนู 10 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม (ตารางที่ 3.18 และ 3.19) เนื่องจากฟอสเฟตที่อยู่ในดินช่วยในการลดอาร์เซนเนตที่เข้าสู่เซลล์พืชได้ (Zhao *et al.*, 2008) สอดคล้องกับการศึกษาสารหนูในข้าว (Te, 2017) และข้าวสาลี (Pigna *et al.*, 2010) อย่างไรก็ตามการใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นในดินที่มีความเข้มข้นของสารหนูต่ำมีแนวโน้มลดความเข้มข้นของสารหนูในเมล็ดข้าวได้ อย่างเห็นได้ชัดเจนนเมื่อใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 200, 300 และ 400 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม (ตารางที่ 3.23) ซึ่งความเข้มข้นของสารหนูในเมล็ดข้าวไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดในประเทศไทย (2.0 mg kg^{-1}) (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2529) อาจเป็นเพราะว่ามีการสะสมสารหนูบริเวณรากสูงทำให้สารหนูมีการเคลื่อนที่ขึ้นสู่ส่วนเหนือดินน้อย (Das *et al.*, 2013) ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารหนูในข้าวที่พบมากที่สุด คือ บริเวณราก >ตอซึ่ง>เมล็ด (ตารางที่ 3.21, 3.22 และ 3.23) แต่ในขณะที่เดียวกันความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรากและตอซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย (ตารางที่ 3.21 และ 3.22) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Rauf และคณะ (2011) พบว่า ความเข้มข้นของสารหนูในราก ตอซึ่ง แกลบ และเมล็ดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อสารหนูในดินสูงขึ้น แต่ในขณะที่เดียวกันความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในตอซึ่ง แกลบ และเมล็ดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารหนูที่สูงขึ้นด้วย และยังสอดคล้องกับการทดลองของนักวิจัยอื่นๆ (Abedin *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2006, Smith *et al.*, 2008; Bhattacharya *et al.*, 2010)

การใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 200 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ร่วมกับสารหนู 10 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม พบว่า ความเข้มข้นของธาตุอาหารต่าง ๆ เช่น ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด โพแทสเซียมทั้งหมด แคลเซียมทั้งหมด และแมกนีเซียมทั้งหมด ในตอซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) (ตารางที่ 3.19) ซึ่งตรงกันข้ามกับการศึกษาในข้าวบาร์เลย์เมื่อใส่ฟอสฟอรัสร่วมกับสารหนู พบว่า ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และสังกะสี ในรากและหน่อเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Shaibur *et al.*, 2013) ในขณะที่เดียวกันการใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 200 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ร่วมกับสารหนู 10 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม และการใส่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นในดินที่มีความเข้มข้นของสารหนูต่ำ มีแนวโน้มเพิ่มการดูดใช้ธาตุอาหารและมีแนวโน้มลดสารหนูในราก ตอซึ่ง และเมล็ด (ภาพที่ 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30) สอดคล้องกับการศึกษาในข้าว (Te, 2017) อย่างไรก็ตาม การใส่ฟอสฟอรัสมากเกินไปร่วมกับสารหนู 10 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ทำให้มีแนวโน้มลดการดูดใช้สังกะสีในราก ตอซึ่ง และเมล็ด (ภาพที่ 3.22) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Joardar และ Kawai (2014)

พบว่า การใส่ฟอสฟอรัสมากเกินไปทำให้เกิดการขาดธาตุสังกะสีและไม่มีผลต่อความเข้มข้นของ โปแทสเซียม แมกนีเซียม เหล็ก และโซเดียม ในผักโขมญี่ปุ่น

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ประกอบด้วย 2 การทดลอง คือ 1) สถานะสารหนูและสมบัติของดินที่ปนเปื้อนสารหนูจากอำเภออ่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช และ 2) ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตลดความเป็นพิษของสารหนูในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 โดยสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. สถานะสารหนูและสมบัติของดินที่ปนเปื้อนสารหนูจากอำเภออ่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช

สารหนูทั้งหมดในดินบนและดินล่างมีปริมาณสูงมาก ซึ่งสารหนูส่วนใหญ่ในดินบนอยู่ในรูปสารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์อสังฐาน รองลงมาเป็นรูปสารหนูที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เป็นผลึก แต่พบสารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจงน้อย และพบความสัมพันธ์กันสูงระหว่างรูปสารหนูที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจงกับผลรวมของสารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจงกับที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างสารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจงและที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจงกับ อินทรีย์วัตถุ ไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ในขณะที่สารหนูทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในดินบนบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดมีปริมาณสารหนูในรูปที่มีศักยภาพในการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมสูง (สารหนูที่ถูกดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจงและสารหนูที่ถูกดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิดสารหนูเพิ่มขึ้น ข้อมูลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าบริเวณพื้นที่ศึกษาถึงแม้ว่าจะมีสารหนูรูปที่เกี่ยวข้องกับเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์อสังฐานและที่เป็นผลึกสูงซึ่งเป็นรูปที่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อมได้ยาก แต่บางบริเวณมีสารหนูรูปที่มีศักยภาพในการปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมสูงเกินค่ามาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องหาแนวทางในการลดสารหนูในดิน โดยเฉพาะบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดสารหนู

2. ผลของการใช้ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตลดความเป็นพิษของสารหนูในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1

ข้าวที่ปลูกในดินที่ระดับความเข้มข้นของสารหนูสูง (20 mg kg^{-1}) จะเริ่มแสดงอาการเป็นพิษของสารหนูในต้นข้าวในช่วงระยะแตกกอของข้าว ขอบใบม้วนเข้าหากัน หลังจากนั้นใบข้าวหงิกงอและแห้ง ต้นข้าวตายก่อนถึงระยะเก็บเกี่ยว ที่ระดับความเข้มข้นของสารหนูต่ำ

พบว่า เริ่มแสดงอาการในช่วงระยะสร้างช่อดอกอ่อนของข้าว ปลายใบล่างเริ่มมีสีแดง แผ่นใบเหลือง และขยายไปสู่เส้นกลางใบ นอกจากนี้ความเป็นพิษของสารหนูยังขัดขวางการเจริญเติบโตของรากข้าว ทำให้รากสั้นและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลดำ ส่งผลให้ความสูงของต้นจำนวนกอ และน้ำหนักแห้งของข้าวลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารหนูในดิน อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสารหนูในข้าวที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทำให้ขัดขวางการดูดใช้ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และสังกะสี การใส่ปุ๋ยฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้นของสารหนูสูง ทำให้การเจริญเติบโต เช่น ความสูง จำนวนกอ น้ำหนักแห้งของรากและตอซัง และผลผลิตเมล็ดมีแนวโน้มลดลง การดูดใช้ธาตุอาหารลดลง ในขณะที่เกี่ยวกับการใส่ปุ๋ยฟอสเฟตในดินที่มีระดับความเข้มข้นของสารหนูต่ำ พบว่า มีแนวโน้มทำให้การเจริญเติบโต การดูดใช้ธาตุอาหารเพิ่มขึ้น และสารหนูในเมล็ดลดลง ข้อมูลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าการใส่ปุ๋ยฟอสเฟตไม่สามารถลดความเป็นพิษของสารหนูในดินที่มีความเข้มข้นของสารหนูสูง (20 และ 10 mg kg⁻¹) แต่มีแนวโน้มลดความเป็นพิษของสารหนูในดินที่มีการปนเปื้อนสารหนูต่ำ ดังนั้น แนวทางการใช้ทริบิเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตลดความเป็นพิษของสารหนูในดินนั้น อาจจะเหมาะกับดินที่มีระดับความเข้มข้นของสารหนูในดินต่ำ ขณะที่ในดินที่มีความเข้มข้นของสารหนูสูงอาจต้องหาแนวทางอื่นในการแก้ไขต่อไป

เอกสารอ้างอิง

กิตติยา รัชวงศ์. 2542. พฤติกรรมเสี่ยงและแหล่งที่มาของการได้รับสารหนูในเด็กนักเรียน ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2547. มาตรฐานคุณภาพดิน กรุงเทพฯ : สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมแผนที่ทหาร. 2542. แผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1:50,000 ลำดับชุด L7018 ระวัง 4925 II จังหวัดนครศรีธรรมราช.

กรมวิชาการเกษตร. 2531. การศึกษาปริมาณสารหนูในดิน-น้ำ เพื่อการเกษตรและพืช ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช. กรุงเทพฯ : กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กรมวิชาการเกษตร. 2548. คำแนะนำการใช้ปุ๋ยกับพืชเศรษฐกิจ. กรุงเทพฯ : กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กองวิจัยและพัฒนาข้าว. 2557. องค์ความรู้เรื่องข้าว. กรุงเทพฯ : กรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ขวัญหทัย ปันศรี. 2547. ผลของซิลิกอนร่วมกับไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมต่อผลผลิต และการดูดใช้ธาตุอาหารของข้าวที่ปลูกในดินนาสองชุดดิน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คณะกรรมการจัดทำพจนานุกรมปฐพีวิทยา. 2551. พจนานุกรมปฐพีวิทยา. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จันทร์เพ็ญ ชูประภาวรรณ. 2535. ปัญหาพิษสารหนูที่อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช. การประชุมปฏิบัติการระหว่างกระทรวงสาธารณสุขและคณะกรรมการระบาดวิทยาแห่งชาติ ณ โรงแรมรอยัลการ์เด้นรีสอร์ท หัวหิน จ.ประจวบคีรีขันธ์ วันที่ 20-21 พฤศจิกายน 2535.

จรีรัตน์ กุศลวิริยะวงศ์ และวรรณรัตน์ ชูติบุตร. 2553. ประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดินจากรายงานผลการวิเคราะห์. น.ส.พ. กสิกร. 83: 55–61.

จำเป็น อ่อนทอง. 2557. การวิเคราะห์ดินและพืช. สงขลา : ภาควิชาธรณีศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

จำเป็น อ่อนทอง และจักรกฤษณ์ พูนภักดี. 2557. คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช. สงขลา : ภาควิชาธรณีศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ธมลวรรณ วุ่นพันธ์. 2551. ปริมาณสารหนูในตัวอย่างหิน พื้นที่เขียงของ จังหวัดเชียงรายและพะเยา. กรุงเทพฯ : กองทรัพยากรและการวิเคราะห์แร่ กรมทรัพยากรธรณี.

เนตรนภา อินสลด ทศพร บ่อบัวทอง และกิตติพจน์ แยมจันทร์. 2561. ผลของระดับฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันต่อการเจริญเติบโตของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. ว. เกษตร. 46: 546–550.

บุญธรรม กิจปรีดาบรรสุทธิ์. 2553. สถิติวิเคราะห์เพื่อการวิจัย. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์เรือนแก้วการพิมพ์.

ประกายรัตน์ สุวรรณ. 2548. คู่มือการใช้โปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 12 สำหรับ Windows. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.

พัชร์เพ็ญ ภูมิพันธ์, สมชาย ชคตระการ, วรภัทร ลัดคนทินวงศ์, ชวินทร์ ปลื้มเจริญ, ภิรญา ชมพูผิว และอรประภา เทพศิลป์วิสุทธิ์. 2559. การเปรียบเทียบระหว่างปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูงต่อคุณภาพข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 24: 753–765.

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2558. การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืช. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พิชญ์นิภา ขวัญเผือก และวัลย์รัตน์ จันทร์อัมพร. 2556. การดูดซับสารหนูในน้ำปนเปื้อนด้วยตัวดูดซับสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 51 : สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร วันที่ 5-7 กุมภาพันธ์ 2556 หน้า 136-143.

พึงใจ ลิ้มเจริญ. 2531. ปัญหาพิษสารหนูที่อำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครศรีธรรมราช. กรุงเทพฯ : กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม.

ไพบูลย์ วิวัฒน์วงศ์วนา. 2546. เคมีดิน. เชียงใหม่ : คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ยงยุทธ โอสภสภา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และชวลิต ฮงประยูร. 2551. ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ละออง วุฒิพันธุ์, ประวิทย์ ไตว์ฉนะ, สุรพล อารีย์กุล และวีระศักดิ์ จงสู่วัฒน์วงศ์. 2550. การดูดซับสารหนูของดินลูกรัง หินปูนฝุ่น ปูนขาว และถ่านลอย ในดินที่ปนเปื้อนสารหนู. ว. สงขลานครินทร์ วทท. 29: 401-411.

วรรณวิมล ภัทธรวิวงศ์, พนมพร วงษ์ปาน และวิชาญ แก้วประสม. 2547. การศึกษาชนิดและระดับของสารหนูในผลิตภัณฑ์การเกษตรในพื้นที่อำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครศรีธรรมราช. กรุงเทพฯ : กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, ชัยสิทธิ์ ทองจู้ และแสงดาว เขาแก้ว. 2559. มลพิษทางดิน. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุวลีย์ ตันทวิวัฒน์. 2539. การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อประเมินหาพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคพิษสารหนูเรื้อรัง กรณีศึกษา : อำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครศรีธรรมราช. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยมหิดล.

สุวรรณี ภูธรราช. 2537. การสะสมของสารหนูในเนื้อเยื่อต่างๆ ของพืชบางชนิด. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมศรี อรุณินท์. 2542. พีชทนเค็ม. กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. 2529. มาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อน. กรุงเทพฯ : กระทรวงสาธารณสุข.

- หัทธยา กาญจนสมบัติ. 2547. การศึกษาการสะสมและอาการเกิดพิษของสารหนูและตะกั่วในพืชผัก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยมหิดล.
- อนงค์ ไพจิตรประภาภรณ์. 2540. สถานการณ์ปัญหาและการแก้ไขการแพร่กระจายของสารหนูอำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช. การประชุมทางวิชาการโดยกรมทรัพยากรธรณี ณ โรงแรมนิวกัง กรุงเทพมหานคร วันที่ 2 กรกฎาคม 2540.
- อานนท์ ทรงศิริกุล. 2537. ผลกระทบจากน้ำท่วมต่อการตกค้างของสารหนูในบ่อน้ำผิวดินที่อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ภาคใต้ของประเทศไทย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยมหิดล.
- อารี สุวรรณมณี. 2534. การแพร่กระจายของสารหนูในสภาพแวดล้อม อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เอิบ เขียววีรณมณี. 2533. ดินของประเทศไทย. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Abedin, M.J. and Meharg, A.A. 2002. Relative toxicity of arsenite and arsenate on germination and early seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Soil*. 243: 57–66.
- Abedin, M.J., Cresser, M.S., Meharg, A.A., Feldmann, J. and Howells, C.J. 2002. Arsenic accumulation and metabolism in rice (*Oryza sativa* L.). *J. Environ. Sci. Technol.* 36: 962–968.
- Adomako, E.E., Williams, P.N., Deacon, C. and Meharg, A.A. 2011. Inorganic arsenic and trace element in Ghanaian grain staples. *Environ. Pollut.* 159: 2435–2442.
- Alam, M. G. M. , Snow, E. T. and Tanaka, A. 2003. Arsenic and heavy metal contamination of vegetables grown in Samta village, Bangladesh. *Sci. Total Environ.* 308: 83–96.

- Alvarez-Ayuso, E., Abad-Valle, P., Murciego, A. and Villar-Alonso, P. 2016. Arsenic distribution in soils and rye plants of a cropland located in an abandoned mining area. *Sci. Total Environ.* 542: 238–246.
- Bhattacharya, P., Samal, A.C. and Majumdar, J. 2010. Arsenic Contamination in Rice, Wheat, Pulses, and Vegetables: A Study in an Arsenic Affected Area of West Bengal, India. *Water Air Pollut.* 213: 3–13.
- Bowen, H. J. M. 1979. *Environmental Chemistry of the Elements* : Academic Press. London.
- Boyle, R.W. and Jonasson, I.R. 1973. The geochemistry of arsenic and its use as an indicator element in geochemical prospecting. *J. Geochem. Explor.* 2: 251–296.
- Choudhury, B., Chowdhury, S. and Biswas, A.K. 2011. Regulation of growth and metabolism in rice (*Oryza sativa* L.) by arsenic and its possible reverse by phosphate. *J. Plant Interactions* 6: 15–24.
- Cozzolino, V., Pigna, M., Di Meo, V., Caporale, A.G., Violante, A. and Meharg, A.A. 2010. Influence of phosphate addition on the arsenic uptake by wheat (*Triticum durum*) grown in arsenic polluted soils. *Fresenius Environ. Bulletin* 19: 838–845.
- Cullen, R.W. and Reimer, K.J. 1989. Arsenic speciation in the environment. *Rev. J. Chem.* 89: 713–764.
- Das, I., Ghosh, K., Das, D.K. and Sangal, S.K. 2013. Assessment of arsenic toxicity in rice plants in area of west Bengal. *J. Chem. Spe. Bio.* 25: 201-208.
- Davenport, J.R. and Peryea, F.J. 1991. Phosphate fertilizers influence leaching of lead and arsenic in a soil contaminated with lead arsenate. *Water Air Soil Pollution* 57: 101–110.

- Day, P.R. 1965. *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Delowar, H.K.M., Yoshida, I., Harada, M., Sarkar, A.A., Miah, M.N.H., Razzaque, A.H.M., Uddin, M.I., Adhana, K. and Perveen, M.F. 2005. Growth and uptake of Arsenic by rice irrigated with As-contaminated water. *J. Food, Agriculture and Environ.* 3: 287–291.
- Environment Agency. 2004. *The State of Soils in England and Wales*. Environment Agency, Bristol, USA.
- Environment Canada. 2002. *Canadian Environmental Quality Guidelines*. Available: www.ccme.ca/assets/pdf/e1_06.pdf [6 June 2016].
- Francesconi, K., Visoottiviseth, P., Sridokchan, W. and Goessler, W. 2002. Arsenic species in an arsenic hyperaccumulating fern, *Pityrogramma calomelanos*: a potential phytoremediator of arsenic-contaminated soils. *Sci. Total Environ.* 284: 27–35.
- García-Sánchez, A. and Alvarez-Ayuso, E. 2003. Arsenic in soils and waters and its relation to geology and mining activities (Salamanca Province, Spain). *J. Geochem. Explor.* 80: 69–79.
- Ghosh, M., Shen, J. and Rosen, B.P. 1999. Pathways of As (III) detoxification in *Saccharomyces cerevisiae*. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 96: 5001–5006.
- Gleyzes, C., Tellier, S. and Astruc, M. 2002. Fractionation studies of trace elements in contaminated soils and sediments: a review of sequential extraction procedures. *Trends Anal. Chem.* 21: 451–467.
- Goh, K.H. and Lim, T.T. 2004. Geochemistry of inorganic arsenic and selenium in a tropical soil: effect of reaction time, pH, and competitive anions on arsenic and selenium adsorption. *Chemosphere.* 55: 849–859.

- Hanada, S., Nakano, M., Saito, H. and Mochizuki, T. 1975. Studies on the pollution of apple orchard surface soil and its improvement in relation to inorganic spray residues. I. Bull Facul Agric, Hirosaki University, Japan. 25: 13–17.
- Hartley-Whitaker, J., G. Ainsworth and A.A. Meharg. 2001. Copper and arsenate induced oxidative stress in *Holcus lanatus* L. clones with differential sensitivity. *Plant Cell Environ.* 24: 713–722.
- Havlin, J.B., Beaton, J.D. Tisdale, S.L. and Nelson, W.L. 2005. *Soil Fertility and Fertilizer: An Introduction to Nutrient Management.* Prentice–Hall, Inc. New Jersey.
- Hazelton, P. and Murphy, B. 2007. *Interpreting Soil Test Results.* Australia: CSIRO Publishing.
- Hindmarsh, J.T. 2000. Arsenic, its clinical and environmental significance. *J. Trace Elem. Med. Bio.* 13: 165–172.
- Hoang, T.Q.T. and Hahn, C. 2015. Arsenic fractionation in agricultural soil in Vietnam using the sequential extraction procedure. *In Proc. The 4th Dresden University of Technology International Conference, 24 March 2015.* p. 82.
- Hossain, M.B., Jahiruddin, M., Loeppert, R.H., Panaullah, G.M., Islam, M.R. and Duxbury, J.M. 2009. The effect of iron plaque and phosphorous on yield and arsenic accumulation in rice. *J. Plant Soil* 317: 167–176.
- Hsu, W.M., His, H.C., Huang, Y.T., Liao, C.S. and Hseu, Z.Y. 2012. Partitioning of arsenic in soil–crop systems irrigated using groundwater: A case study of rice paddy soil in southwestern Taiwan. *Chemosphere.* 86: 606–613.
- Islam, M.R. and Jahiruddin, M. 2010. Effect of arsenic and its interaction with phosphorous on yield and arsenic accumulation in rice. *Proceedings of the 9th World Congress of Soil Science, Soil solution for changing world, Brisbane, Australia, 1-6 August 2010,* pp. 91-94.

- Jampanil, J. 2000. Efficiency of Arsenic Removal from Soil by *Colocasia Esculenta* (L.) Schott (Dark Violet and Green). MS Thesis. Department of Environmental Science. Graduate School, Chulalongkorn University.
- Joardar, J.C. and Kawai, S. 2014. Effect of Phosphorous for Silicon on the Arsenic Content of Japanese Mustard Spinach (*Brassica rapa* var. *perviridis*) Grown on Arsenic Contaminated Soil. *Int. J. Plant and Soil Sci.* 3: 113–128.
- Jones, J.B. 2001. *Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis*. CRC Press, Boca Raton.
- Karczewska, A., Krysiak, A., Mokrzycka, D., Jezierski, P. and Szopka, K. 2013. Arsenic distribution in soils of a former As mining area and processing. *Pol. J. Environ. Stud.* 22: 175–181.
- Kim, E. J., Yoo, J.C. and Baek, K. 2014. Arsenic speciation and bioaccessibility in arsenic contaminated soils: Sequential extraction and mineralogical investigation. *Environ. Pollut.* 186: 29–35.
- Kitagishi, K. and Yamane, I. 1981. *Heavy Metal Pollution in Soil of Japan*. Japan Science Society Press. Tokyo.
- Krauskopf, K.B. and Loague, K. 2002. *Environmental Geochemistry*. Encyclopedia of Physical Science and Technology. New York, United States.
- Krysiak, A. and Karczewska, A. 2007. Arsenic extractability in soils in the areas of former arsenic mining and smelting, SW Poland. *Sci. Total Environ.* 379: 190–200.
- Kumpiene, J., Lagerkvist, A. and Naurice, C. 2008. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendements a review. *Waste Manage.* 28: 215–225.

- Landon, J.R. 1991. Booker Tropical Soil Manual: A Handbook for Soil Survey and Agricultural Land Evaluation in the Tropics and Subtropics. Longman Scientific and Technical, Essex, New York.
- Lee, J.S., Lee, S.W., Chon, H.T. and Kim, K.W. 2008. Evaluation of human exposure to arsenic due to rice ingestion in the vicinity abandoned Myungbong Au-Ag mine site, Korea. *Journal of Geochemical Exploration* 96: 231–235.
- Leonard, A. 1991. Arsenic. *Metals and their Compounds in the Environment*. New York.
- Li, R.Y., Ago, Y., Liu, W.J., Mitani, N., Feldmann, J., McGrath, S.P., Ma, J.F. and Zhao, F.J. 2009. The rice aquaporin Lsi1 mediates uptake of methylated arsenic species. *Plant Physiol.* 20: 71–80.
- Liu, Q.J., Zheng, C.M., Hu, C.X., Tan, Q.L., Sun, X.C. and Su, J.J. 2012. Effect of high concentrations of soil arsenic on the growth of winter wheat (*Triticum aestivum* L) and rape (*Brassicanapus*). *J. Plant Soil Environ.* 58: 22–27.
- Liu, W.J., Zhu, Y.G., Hu, Y., Williams, P.N., Gault, A.G., Meharg, A.A., Charnock, J.M. and Smith, F.A. 2006. Arsenic sequestration in iron plaque, its accumulation and speciation in mature rice plants (*Oryza sativa* L.). *Environ. Sci. Technol.* 40: 5730–5736.
- Lock, A., Wallschlager, D., Belzile, N., Spiers, G. and Gueguen, C. 2018. Rates and processes affecting As speciation and mobility in lake sediments during aging. *J. Environ. Sci.* 66: 338–347.
- Lu, Y., Dong, F., Deacon, C., Chen, H.U., Reab, A. and Meharg, A.A. 2010. Arsenic accumulation and phosphorous status in two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars surveyed from fields in South China. *Environ. Pollut.* 158: 1536–1541.

- Lynch, J. 1999. Additional provisional elemental values for LKSD-1, LKSD-2, LKSD-3, LKSD-4, STSD-1, STSD-2, STSD-3 and STSD-4. *Geostandards Newsletter*. 23: 251-260.
- Ma, J.F., Yamaji, N. and Mitani, N. 2008. Transporters of arsenite in rice and their role in arsenic accumulation in rice grain. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 105: 9931-9935.
- Marin, A.R., Masscheleyn, P.H. and Patrick Jr, W.H. 1993. Soil redox-pH stability of arsenic species and its influence on arsenic uptake by rice. *Plant and Soil* 15: 245-253.
- Marques, A.P.G.C., Moreira, H., Rangel, A.O.S.S. and Castro, P.M.L. 2009. Arsenic, lead and nickel accumulation in *Rubus ulmifolius* growing in contaminated soil in Portugal. *J. Hazardous Materials*. 165: 174-179.
- Meharg, A.A. 1994. Integrated tolerance mechanisms-constitutive and adaptive plant-responses to elevated metal concentrations in the environment. *Plant Cell Environ.* 17: 989-993.
- Meharg, A.A. 2004. Arsenic in rice—understanding a new disaster for South-East Asia. *Trends Plant Sci.* 9: 415-417.
- Meharg, A.A. 2005. Mechanism of plant resistance to metal and metalloid ions and potential biotechnological applications. *Plant Soil*. 274: 163-174.
- Meharg, A.A., Adomako, E., Lawgali, V., Deacon, C. and Williams, P. 2007. Food Standards Agency Contract C101045: Levels of arsenic in rice-literature review.
- Meharg, A.A., Naylor, J. and Macnair, M.R. 1994. Phosphorous nutrition of arsenate tolerant and nontolerant phenotypes of velvetgrass. *J. Environ. Qual.* 23: 234-238.

- Meharg, A.A. and Rahman, M.M. 2003. Arsenic contamination of Bangladesh paddy field soil: Implication for rice contribution to arsenic consumption. *J. Environ. Sci. Technol.* 37: 229–234.
- Meharg, A.A., Williams, P.N., Adomako, E., Lawgali, Y.Y., Deacon, C., Villada, A., Zhao, A., Zhao, F.J., Islam, R., Hossain, S. and Yanai, J. 2009. Geographical variation in total and inorganic As content of polished (white) rice. *Environ. Sci. Technol.* 43: 1612–1617.
- Mehra, O.P. and Jackson, M.L. 2013. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner.* 5: 317–327.
- Novoa-Munoz, J.C., Queijeiro, J.M.G., Blanco-Ward, D., Alvarez-Olleros, C., Garcia-Rodeja, E. and Martinez-Cortizas, A. 2007. Arsenic fractionation in agricultural acid soils from NW Spain using a sequential extraction procedure. *Sci. Total Environ.* 378: 18–22.
- Otones, V., Alvarez-Ayuso, E., Garcia-Sanchez, A., Santa-Regina, I. and Murciego, A. 2011. Mobility and phytoavailability of arsenic in an abandoned mining area. *Geoderma.* 166: 153–161.
- Otte, M.L., Rozema, J., Beek, M.A., Kater, B.J. and Broekman, R.A. 1990. Uptake of arsenic by estuarine plants and interactions with phosphate in the field (Rhine Estuary) and under outdoor experimental conditions. *J. Sci. Total Environ.* 98: 839–854.
- Phimol, P., Visuthismajarn, P., Lin, C. and Rukkur, S. 2017. Assessment of arsenic concentrations and estimated daily intake of arsenic from rice (*Oryza sativa*) in Ron Phibun District, Southern Thailand. *International Journal of Environmental Science and Development.* 8: 517–520.

- Pigna, M., Cozzoline, V., Caporale, A.G., Mora, M.L., Meo, V.D., Jara, A.A. and Violante, A. 2010. Effects of phosphorous fertilization on arsenic uptake by wheat grown in polluted soils. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 10: 428–442.
- Pigna, M., Cozzolino, V., Violante, A. and Meharg, A.A. 2009. Influence of phosphate on the arsenic uptake by wheat (*Triticum durum* L.) irrigated with arsenic solutions at three different concentrations. *J. Water Air Soil Pollut.* 197: 371–380.
- Quaghebeur, M. and Rengel, Z. 2003. The distribution of arsenate and arsenite in shoots and roots of *Holcus lanatus* is influenced by arsenic tolerance and arsenate and phosphate supply. *Plant Physiol.* 132: 1600–1609.
- Raab, A., Wright, S.H., Jaspars, M., Meharg, A.A. and Feldmann, J. 2007. Pentavalent arsenic can bind to biomolecules. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 46: 2594–2597.
- Rahmana M., Hasegawaa, H., Rahmanb, M.M., Miahc, M.A. and Tasmind, A. 2007. Arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.): Human exposure through food chain. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 69: 317–324.
- Rauf, M.A., Hakim, M.A., Hanafi, M.M., Islam, M.M., Rahman, G.K.M.M. and Panaullah, G.M. 2011. Bioaccumulation of arsenic (As) and phosphorous by transplanting Aman rice in arsenic contaminated clay soils. *AJCS.* 5: 1678–1684.
- Redman, A.D., Macalady, D.L. and Ahmann, D. 2002. Natural organic matter affects arsenic speciation and sorption onto hematite. *Environ. Sci. Technol.* 36: 2889–2896.
- Roychowdhury, T., Uchino, T., Tokunaga, H. and Ando, M. 2002. Survey As in food composites from arsenic affected area of West Bengal, India. *Food Chem. J. Toxicol* 40: 1611–1621.
- Sarkar, D and Datta, R. 2004. Human health risks from arsenic in soils: Does one model fit all. *Arch. Environ. Health.* 59: 337–341.

- Schwertmann, U. 1973. Use of oxalate for Fe extraction from soils. *Can. J. Soil Sci.* 53, 244–246.
- Shaibur, M. R., Adjadesh, T.A. and Kawai, S. 2013. Effect of phosphorous on the concentrations of arsenic, iron and some other elements in barley grown hydroponically. *J. Soil Sci. Plant and Nutr.* 13: 87–98.
- Sharma, V.K. and Sohn, M. 2009 Aquatic arsenic : Toxicity, speciation, transformations and remediation. *Environ. Int.* 35: 743–759.
- Sheppard, S.C. 1992. Summary of phytotoxic levels of soil arsenic. *Water Air Soil Pollut.* 64: 539–550.
- Smith, E., Naidu, R., Weber, J. and Juhasz, A.L. 2008. The impact of sequestration on the bioaccessibility of arsenic in long-term contaminated soils. *Chemosphere.* 71: 773–780.
- Sun, G.X., Williams, P.N., Carey, A.M., Zhu, Y.G., Deacon, C., Raab, A., Feldmann, J., Islam, R.M. and Meharg, A.A. 2008. Inorganic arsenic in rice bran and its Products are an order of magnitude higher than in bulk grain. *Environ. Sci. Technol* 42: 7542–7546.
- Taggart, M.A., Carlisle, M., Pain, D.J., Williams, R., Osborn, D., Joyson, A. and Meharg, A.A. 2004. The distribution of arsenic in soils affected by the Aznalcollar mine spill, SW Spain. *Sci. Total Environ.* 323: 137–152.
- Tang, X.Y., Zhu, Y.G., Shan, X.Q., McLaren, R. and Duan, J. 2007. The ageing effect on the bioaccessibility and fractionation of arsenic in soils from China. *Chemosphere* 66: 1183–1190.
- Te, K.S.H. 2017. Alleviations of Arsenic Toxicity in Rice (*Oryza sativa* L.) by Application of Triple Superphosphate and Calcium Silicate. MS Thesis, Prince of Songkla University, Songkhla.

- Visoottiviseth, P., Francesconi, K. and Sridokchan, W. 2002. The potential of Thai indigenous plant species for the phytoremediation of arsenic contaminated land. *Environ. Pollut.* 118: 453–461.
- Walsh, L. M. and Keeney, D. R. 1975. Behaviour and Phytotoxicity of Inorganic Arsenicals in Soils. Department of Soil Science, University of Wisconsin, Madison. 7: 35-53.
- Wang, Y., Zeng, X., Lu, Y., Su, S., Bai, L., Li, L. and Wu, C. 2015. Effect of aging on the bioavailability and fractionation of arsenic in soils derived from five parent materials in a red soil region of Southern China. *Environ. Pollut.* 207: 79–87.
- Wargar, A., Isayenkov, S.V., Maathuis, F.J.M. and Zhao, F.J. 2009. Arsenite transport in plants. *Experientia.* 66: 2329–2339.
- Wedepohl, K. H. 1995. The composition of the continental crust. *Geochemica et Cosmochimica Acta.* 59: 1217–1232.
- Wenzel, W.W., Kirchbaumer, N., Prohaska, T., Stingeder, G., Lombi, E. and Adriano, D.C. 2001. Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure. *Anal. Chim. Acta.* 436: 309–323.
- WHO. 1981. Environmental Health Criteria for Arsenic. World Health Organization, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
- Williams, P. N., Islam, M. R., Adomako, E. E., Raab, A., Hossain, S. A, Zhu, Y. G., Feldman, J. and Meharg, A.A. 2006. Increase in rice grain arsenic for regions for Bangladesh irrigating paddies with elevated arsenic in groundwaters. *Environ. Sci. Technol.* 40: 4903–4908.
- Williams, P. N., Price, A.H. and Raab, A. 2005. Variation in arsenic speciation and concentration in paddy rice related to dietary exposure. *Environ. Sci. Technol.* 39: 5531–5540.

- Williams, P.N., Raab, A. and Feldmann, J. 2007. High levels of arsenic in South Central US rice grain: consequences for human dietary exposure. *Environ. Sci. Technol.* 152: 746–749.
- Wilson, F.H. and Hawkins, D.B. 1978. Arsenic in streams stream sediments and ground water, Fairbanks area, Alaska. *Environ. Geol.* 2: 195–202.
- Xu, X.Y., McGrath, S.P., Meharg, A. and Zhao, F.J. 2008. Growing rice aerobically markedly decreases arsenic accumulation. *Environ. Sci. Technol.* 42: 5574–5579.
- Xu, X.Y., McGrath, S.P. and Zhao, F.J. 2007. Rapid reduction of arsenate in the medium mediated by plant roots. *New Phytol.* 176: 590–599.
- Zavala, Y.J. and Duxbury, J.M. 2008. Arsenic in rice: I. Estimating normal levels of total arsenic rice grain. *Environ. Sci. Technol.* 42: 3856–60.
- Zhao, F. J., Ma, J. F., Meharg, A. and McGrath, S. P. 2008. Arsenic uptake and metabolism in plants. *New phytol.* 181: 777–789.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวจิราภรณ์ แก้วล่องลอย
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5810620055
 วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกษตรศาสตร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2558

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนบัณฑิตศึกษาสงขลานครินทร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

จิราภรณ์ แก้วล่องลอย, ขวัญตา ขาวมี และจำเป็น อ่อนทอง. 2562. สมบัติของดินและระยะ
 จากแหล่งกำเนิดสารหนูต่อรูปของสารหนูในดิน จากอำเภอร่อนพิบูลย์
 จังหวัดนครศรีธรรมราช. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 50(1): 23–37.