



วิทยานิพนธ์

ผลของการใส่ปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมีต่อการดูดกินและสะสมโลหะหนักใน
ข้าวโพดหวานที่ปลูกในชุดดินมวกเหล็ก

**EFFECTS OF COMPOST AND CHEMICAL FERTILIZER
APPLICATION ON THE UPTAKE AND ACCUMULATION OF
HEAVY METALS IN SWEET CORN GROWN ON MUAK LEK
SOIL SERIES**

นางสาวปิยะพร วันสม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2549



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์)

ปริญญา

ปฐพีวิทยา

ปฐพีวิทยา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ผลของการใส่ปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมีต่อการดูดกินและสะสมโลหะหนักในข้าวโพดหวานที่ปลูกในชุดดินมวกเหล็ก

Effects of Compost and Chemical Fertilizer Application on the Uptake and Accumulation of Heavy Metals in Sweet Corn Grown on Muak Lek Soil Series

نامผู้วิจัย นางสาวปิยะพร วันสม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(อาจารย์สุเทพ ทองแพ, วท.ค.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยฤกษ์ สุวรรณรัตน์, Dr.agr.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์อิสรา สุขสถาน, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อัญชลี สุทธิประการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อัจฉกหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของการใส่ปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมีต่อการดูดกินและสะสมโลหะหนักในข้าวโพดหวานที่ปลูกในชุด
ดินมวกเหล็ก

Effects of Compost and Chemical Fertilizer Application on the Uptake and Accumulation of
Heavy Metals in Sweet Corn Grown on Muak Lek Soil Series

โดย

นางสาวปิยะพร วันสม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์)
พ.ศ. 2549

ISBN 974-16-2925-7

ปิยะพร วันสม 2549: ผลของการใส่ปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมีต่อการดูดกินและสะสมโลหะหนักใน
ข้าวโพดหวานที่ปลูกในชุดดินมวกเหล็ก ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) สาขา
ปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา ประธานกรรมการที่ปรึกษา: อาจารย์สุเทพ ทองแพ, วท.ด. 134 หน้า
ISBN 974-16-2925-7

การศึกษาผลของการใส่ปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมีต่อการดูดกินและสะสมของตะกั่ว แคดเมียม โปรท และ
สารหนูในส่วนต้นและเมล็ดของข้าวโพดหวานพันธุ์ ATS-5 ที่ปลูกในชุดดินมวกเหล็กโดยทำการทดลองใน
โรงเรือนของภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วางแผนการทดลองแบบ 3×2 Factorial in
Completely Randomized Design จำนวน 3 ซ้ำ มี 2 ปัจจัย ปัจจัยแรก คือ อัตราปุ๋ยหมัก ได้แก่ ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, ใส่
ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ปัจจัยที่สอง คือ การใส่ปุ๋ยเคมี (ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 และปุ๋ยยูเรีย
อย่างละ 4 กรัม/ดิน 8 กก.) ประกอบด้วย การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวก่อนปลูก และใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ครั้ง
ละครึ่งหนึ่งของปริมาณทั้งหมดในช่วงก่อนปลูกและเมื่อข้าวโพดอายุ 20 วัน

จากการทดลองพบว่าปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในต้นและเมล็ด และปริมาณโลหะหนักทั้งหมดที่
สะสมในข้าวโพดหวานมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการใส่ปุ๋ยหมัก สำหรับการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและแบ่งใส่ 2 ครั้ง ไม่ทำ
ให้ความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม ในต้นและเมล็ด และปริมาณตะกั่ว แคดเมียม และโปรททั้งหมดที่สะสมใน
ข้าวโพดหวานมีความแตกต่างกัน การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ให้ความเข้มข้นของโปรทในต้นต่ำกว่า
การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียว แต่การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ให้ความเข้มข้นของสารหนูและปริมาณสารหนู
ทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียว เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของโลหะ
หนักในต้นและเมล็ดพบว่า ความเข้มข้นของตะกั่วและสารหนูในส่วนต้นมีต่ำกว่าในส่วนเมล็ด แต่ความเข้มข้น
ของแคดเมียมและโปรทในส่วนต้นสูงกว่าในส่วนเมล็ด เมื่อนำค่าความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดมา
เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานอาหารที่มีสารปนเปื้อนของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวง
สาธารณสุข พบว่าความเข้มข้นของตะกั่วและโปรทในต้นและเมล็ดสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนด แต่ความเข้มข้น
ของแคดเมียมและสารหนูในต้นและเมล็ดต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด โดยค่ามาตรฐานที่กำหนดให้มีได้ในอาหาร
ของ ตะกั่ว แคดเมียมโปรท และสารหนู เท่ากับ 1, 0.8, 0.02 และ 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

Piyaporn Wansom 2006: Effects of Compost and Chemical Fertilizer Application on the Uptake and Accumulation of Heavy Metals in Sweet Corn Grown on Muak Lek Soil Series. Master of Science (Agriculture), Major Field: Soil Science, Department of Soil Science. Thesis Advisor: Mr. Suthep Thongpae, Ph.D. 134 pages.
ISBN 974-16-2925-7

Effects of compost and chemical fertilizer application on the uptake and accumulation of heavy metals in plant and grain of sweet corn (ATS-5 var.) grown on Muak Lek soil series were studied at department of Soil Science, Kasetsart University, Bangkok campus. Pot experiment was conducted based on a 3×2 factorial in Completely Randomized Design with 3 replications. The first factor was the compost rate: 0, 75 and 150 g/8 kg of soil. The second factor was the chemical fertilizer (4 g of 15-15-15 fertilizer and 4 g of urea/8 kg of soil) applied once at planting date and applied 2 times (at planting and 20 days after emergence)

The results indicated that the concentration and total uptake of heavy metals (lead, cadmium, mercury and arsenic) in plant and grain were increased with the application of compost. For the application of chemical fertilizer gave no different concentrations of lead and cadmium in plant and grain and gave no different total uptake of lead, cadmium and mercury in the whole plant. The application 2 times of chemical fertilizers caused the mercury concentration in the plant to be lower than that once application. However, the application 2 times resulted in higher concentration of arsenic in plant and grain, and higher total uptake of arsenic than that once application. As compare the concentration of heavy metals in plant and grain, the result showed that the concentrations of lead and arsenic in plant were lower than that in grain but the concentrations of cadmium and mercury in plant were higher than that in grain. To compare the concentration of heavy metals to standard of acceptable contamination level of heavy metals in Law of Food and Drugs Administration, Ministry of Public Health of Thailand (1 mg Pb, 0.08 mg Cd, 0.02 mg Hg and 2 mg As/kg), the result showed that the concentrations of lead and mercury in plant and grain were found to be higher than the standard but the concentrations of cadmium and arsenic in plant and grain were found to be lower than the standard.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ดร. สุเทพ ทองแพ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้คำแนะนำซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยฤกษ์ สุวรรณรัตน์ กรรมการวิชาเอก รองศาสตราจารย์ ดร. อิศรา สุขสถาน กรรมการวิชาการ และ รองศาสตราจารย์ ณรงค์ สิงห์บุระอุดม กรรมการผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณอาจารย์เสาวนุช ถาวรพฤษ์ ที่คอยช่วยเหลือในการวัดปริมาณโลหะหนัก คุณสมชาย กริฑาภิรมย์ และคุณชัยภัทร คงแก้ว ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการวิเคราะห์ดินและพืชทางเคมีมาโดยตลอด ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง สโมสรนิสิตบัณฑิตวิทยาลัยทุกคน พี่ และจิ๊ก ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงได้ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสาทวิชาความรู้จนทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จทางการศึกษา ความดีและประโยชน์อันใดที่จะได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่คุณพ่อ คุณแม่ และคณาจารย์ผู้ประสาทวิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า

ปิยะพร วันสม

มีนาคม 2549

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	40
อุปกรณ์	40
วิธีการ	43
ผลและวิจารณ์	51
ผล	51
วิจารณ์	89
สรุปและข้อเสนอแนะ	91
สรุป	91
ข้อเสนอแนะ	92
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	93
ภาคผนวก	105
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	134

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณแคะเมียมในดินบนชนิดต่างๆ	14
2	ปริมาณสารแคะเมียมที่สะสมในพืชชนิดต่างๆ และส่วนของพืชที่ปลูกในดินของประเทศไทย	15
3	ปริมาณปรอทในดินบนชนิดต่างๆ	23
4	ปริมาณปรอทในพืชที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อน	24
5	ปริมาณสารหนูในดินบนชนิดต่างๆ	31
6	ปริมาณโลหะหนักในดินที่ใช้เพาะปลูกของประเทศไทย	33
7	ค่าสูงสุดของโลหะหนักที่ถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ให้มีในดินและค่าวิกฤติในพืชที่เริ่มยับยั้งการเจริญเติบโต	33
8	มาตรฐานของโลหะหนักในอาหาร	34
9	ความเข้มข้นของโลหะหนักในพืชชนิดต่างๆ	39
10	ค่าวิเคราะห์สมบัติบางประการของชุดดินมวกเหล็ก	52
11	ค่าวิเคราะห์พื้นฐานบางประการของปุ๋ยหมัก	54
12	ค่าวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในดินและปุ๋ยที่ใช้ในการทดลอง	55
13	น้ำหนักแห้งของต้นข้าวโพดหวาน	58
14	น้ำหนักแห้งเมล็ดข้าวโพดหวาน	59
15	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน	64
16	ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในต้นของข้าวโพดหวาน	65
17	ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในเมล็ดของข้าวโพดหวาน	66
18	ปริมาณแคะเมียมทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน	71
19	ปริมาณความเข้มข้นของแคะเมียมในต้นของข้าวโพดหวาน	72
20	ปริมาณความเข้มข้นของแคะเมียมในเมล็ดของข้าวโพดหวาน	73
21	ปริมาณปรอททั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน	78
22	ปริมาณความเข้มข้นของปรอทในต้นของข้าวโพดหวาน	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
23	ปริมาณความเข้มข้นของปรอทในเมล็ดของข้าวโพดหวาน	80
24	ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน	85
25	ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในดินของข้าวโพดหวาน	86
26	ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในเมล็ดของข้าวโพดหวาน	87

ตารางผนวกที่

1	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในแต่ละดำรับการทดลอง	106
2	ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดในแต่ละดำรับการทดลอง	106
3	ปริมาณปรอททั้งหมดในแต่ละดำรับการทดลอง	106
4	ปริมาณสารหนูทั้งหมดในแต่ละดำรับการทดลอง	106
5	ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินหลังปลูก	107
6	ค่าการนำไฟฟ้าของดินหลังปลูก	108
7	ความสูงของข้าวโพดหวานอายุ 20 วัน	109
8	ความสูงของข้าวโพดหวานอายุ 40 วัน	110
9	ความสูงของข้าวโพดหวานอายุ 60 วัน	111
10	น้ำหนักสดของต้นข้าวโพดหวาน	112
11	น้ำหนักสดของเมล็ดข้าวโพดหวาน	113
12	ปริมาณตะกั่วที่สะสมในดินของข้าวโพดหวาน	114
13	ปริมาณตะกั่วที่สะสมในเมล็ดของข้าวโพดหวาน	115
14	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในดินของข้าวโพดหวาน	116
15	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในเมล็ดของข้าวโพดหวาน	117
16	ปริมาณปรอทที่สะสมในดินของข้าวโพดหวาน	118
17	ปริมาณปรอทที่สะสมในเมล็ดของข้าวโพดหวาน	119
18	ปริมาณสารหนูที่สะสมในดินของข้าวโพดหวาน	120

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
19	ปริมาณสารหนูที่สะสมในเมล็ดของข้าวโพดหวาน	121
20	มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม	122
21	ปริมาณโลหะหนักที่ยอมรับได้ในปุ๋ยหมัก	122
22	ค่าความเข้มข้นที่ยอมรับได้ (maximum permitted concentration) ของ อาหารและผลิตภัณฑ์เกษตรบางชนิดของประเทศออสเตรเลีย	123
23	ค่าความเข้มข้นที่ยอมรับได้ (maximum permitted concentration) ของ อาหารในฮ่องกง	124
24	ข้อจำกัดของสมบัติทางเคมีที่ใช้ประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน	125
25	แสดงการเปลี่ยน non SI unit เป็น SI unit	128

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	อิทธิพลร่วมของอัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมีต่อน้ำหนักแห้งของต้นและเมล็ดข้าวโพดหวาน	60
2	อิทธิพลร่วมของอัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณตะกั่วที่สะสมทั้งหมด, ความเข้มข้นของตะกั่วในต้นและเมล็ดข้าวโพดหวาน	67
3	อิทธิพลร่วมของอัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณแคดเมียมที่สะสมทั้งหมด, ความเข้มข้นของแคดเมียมในต้นและเมล็ดข้าวโพดหวาน	74
4	อิทธิพลร่วมของอัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณปรอทที่สะสมทั้งหมด, ความเข้มข้นของปรอทในต้นและเมล็ดข้าวโพดหวาน	81
5	อิทธิพลร่วมของอัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณสารหนูที่สะสมทั้งหมด, ความเข้มข้นของสารหนูในต้นและเมล็ดข้าวโพดหวาน	88
 ภาพผนวกที่		
1	น้ำหนักแห้งของต้นข้าวโพดหวาน และน้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวโพดหวาน	129
2	ปริมาณตะกั่วที่สะสมทั้งหมด, ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในต้นและเมล็ดของข้าวโพดหวาน	130
3	ปริมาณแคดเมียมที่สะสมทั้งหมด, ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในต้นและเมล็ดของข้าวโพดหวาน	131
4	ปริมาณปรอทที่สะสมทั้งหมด, ปริมาณความเข้มข้นของปรอทในต้นและเมล็ดของข้าวโพดหวาน	132
5	ปริมาณสารหนูที่สะสมทั้งหมด, ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในต้นและเมล็ดของข้าวโพดหวาน	133

ผลของการใส่ปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมีต่อการดูดกินและสะสมโลหะหนักในข้าวโพดหวานที่ปลูกในชุดดินมวกเหล็ก

Effects of Compost and Chemical Fertilizer Application on the Uptake and Accumulation of Heavy Metals in Sweet Corn Grown on Muak Lek Soil Series

คำนำ

ประเทศต่างๆ หลายประเทศในโลก มีความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมอย่างมาก มีการแข่งขันด้านอุตสาหกรรมอย่างรุนแรง โดยไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อทรัพยากรดิน ซึ่งได้รับผลกระทบโดยตรงจากการขยายตัวของอุตสาหกรรม เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ปล่อยน้ำเสียหรือสิ่งของเหลือใช้ที่มีการปนเปื้อนของธาตุพิษลงสู่แหล่งน้ำ ดินในบริเวณที่มีน้ำไหลผ่านจะทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับสารต่างๆ ได้ดี นอกจากนี้ดินที่ใช้ทำการเกษตรในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปลูกพืชผักต่างๆ มีแนวโน้มที่อาจมีการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนัก เนื่องจากการใช้ที่ดินเพื่อการเพาะปลูกมาเป็นเวลานานและเกษตรกรจำเป็นต้องใส่ปุ๋ย ไม่ว่าจะเป็นปุ๋ยเคมีหรือปุ๋ยอินทรีย์ อีกทั้งมีการใช้วัสดุปรับปรุงดิน และสารปราบศัตรูพืช ผลที่เกิดตามมาจากการใช้ที่ดินลักษณะนี้ คือ โลหะหนักที่ปนเปื้อนติดมากับวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการเกษตรจะสะสมรวมเข้ากับเนื้อดิน และยากต่อการสลายตัว โลหะหนักบางส่วนจะละลายออกมาอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดเข้าไปสู่รากและเคลื่อนย้ายไปสะสมในส่วนต่างๆ ของพืชได้ ดังนั้นการสะสมโลหะหนักในส่วนต่างๆ ของพืช จึงมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่เป็นผู้บริโภคในห่วงโซ่อาหาร (ปรีดาและคณะ, 2547) จึงมีความจำเป็นที่จะศึกษาผลของการใส่ปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมีในข้าวโพดหวาน ซึ่งเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศ เนื่องจากในปี 2545 มีการส่งออกข้าวโพดหวานในรูปแบบต่างๆ เป็นมูลค่า 1,634 ล้านบาท และเพิ่มขึ้นเป็น 2,122 ล้านบาท ในปี 2546 นอกจากนี้ในปี 2545 โรงงานแปรรูปทั้งหมดในประเทศต้องการผลผลิตข้าวโพดหวานประมาณ 1,200 ตัน/วัน และคาดว่าจะเพิ่มขึ้นเป็น 1,700 ตัน/วัน (กรมวิชาการเกษตร, 2545) โดยศึกษาในชุดดินมวกเหล็ก และมีสมมติฐานว่าการใส่ปุ๋ยหมักและใส่ปุ๋ยเคมี อาจเป็นแนวทางหนึ่งที่จะบอกได้ว่าข้าวโพดหวานมีปริมาณการดูดกินและสะสมของโลหะหนักมากขึ้นหรือน้อยลงอย่างไร เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปจัดการปลูกข้าวโพดหวานในชุดดินมวกเหล็กที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของการใส่ปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมีต่อการดูดกินตะกั่ว แคดเมียม ปรอท และสารหนูของข้าวโพดหวาน
2. เพื่อศึกษาผลของการใส่ปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมีต่อความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม ปรอท และสารหนูในส่วนต้นและเมล็ดของข้าวโพดหวาน

การตรวจเอกสาร

1. โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป เป็นธาตุที่มีเลขอะตอม ตั้งแต่ 22-34 และ 40-52 ในตารางธาตุ รวมทั้งธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์ และแอคทีไนด์ (Hawley, 1977 ; Murphy *et al.*, 1982) ในจำนวนธาตุที่มีการค้นพบประมาณ 105 ธาตุ จะเป็นโลหะ 83 ธาตุ ซึ่งในจำนวน 83 ธาตุนี้จัดเป็นโลหะหนัก 68 ธาตุ โลหะหนักที่รู้จักกันโดยทั่วไป เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท และสารหนู เป็นต้น (Gidding and Monroe, 1972) โลหะหนักสามารถรวมตัวกับ สารประกอบอินทรีย์เกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่มีความเสถียรกว่าเดิม โดยโลหะหนักและ สารประกอบของโลหะหนักสามารถสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต และถ่ายทอดตามห่วงโซ่อาหาร ได้ (Longan and Feltz, 1985)

World Health Organization [WHO] (1977) ได้สรุปว่า โลหะหนัก คือ โลหะที่มีความ ถ่วงจำเพาะมากกว่า 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอม 23-92 และอยู่ในคาบ 4-7 ในตารางธาตุ เกิดขึ้นตาม ธรรมชาติ สำหรับโลหะหนักที่สำคัญ เช่น ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม สังกะสี โครเมียม วานาเดียม โมลิบดีนัม นิเกิล ทองแดง ดีบุก โคบอลต์ แต่ที่ได้รับความสนใจเกี่ยวกับมลพิษสิ่งแวดล้อมมากที่สุดมีเพียง 3 ธาตุ คือ ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว เนื่องจากโลหะหนักทั้ง 3 ธาตุนี้ ถ้ามีในสิ่งแวดล้อม มากเกินไป จะแสดงความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืช สัตว์ และมนุษย์

2. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับตะกั่ว

2.1 ลักษณะและสมบัติ

ตะกั่วเป็นธาตุที่จัดอยู่ในหมู่ IVB มีเลขอะตอม 82 เลขมวล 207.2 (Hawley, 1977) มีความหนาแน่นเท่ากับ 11.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 327 องศาเซลเซียส และมีจุดเดือดที่อุณหภูมิ 1,744 องศาเซลเซียส (Alloway, 1990) ตะกั่วเป็นสารที่มีประจุ 0, +2, +4 โดยตะกั่ว +2 เป็นสารที่พบได้มากที่สุด ตะกั่วมีสมบัติค่อนข้างอ่อนนุ่ม และมีสีเทา โดยจะรวมตัวกับสารอื่น ได้แก่ PbS, PbSO₄, PbCO₃ (เกรียงศักดิ์, 2546) ตะกั่วมีสมบัติทางเคมีและกายภาพ

คล้ายดินบุก สามารถนำมาทำให้บริสุทธิ์ได้ง่ายและทนต่อการผุกร่อนได้ดี มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก แต่ละลายได้บ้างในสารประกอบอะซิเตด (Harrison and Laxen, 1981) ตะกั่วสามารถถูกดูดซับด้วยดิน และขนาดความเป็นพิษของตะกั่วจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่างของดิน, ความกระด้างของน้ำ, สารอินทรีย์ และโลหะหนักอื่นๆ (เกรียงศักดิ์, 2546)

2.2 แหล่งกำเนิด

ตะกั่วมีกระจายทั่วไปในธรรมชาติ ที่เปลือกโลกมีปริมาณเฉลี่ย 10-15 ไมโครกรัม/กรัม ตะกั่วมีแหล่งกำเนิดจากหินอัคนี หินแกรนิต หินปูน หินทราย และดินประมาณ 2-23, 5-50, 5-10, 10-40 และ 10-20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (สุธรรม และ งามพิศ, 2519) และที่พบมากคือหินฟอสเฟต(Phosphate rocks) ซึ่งมีปริมาณมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Sheldon *et al.*, 1953) ตะกั่วเป็นธาตุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ พบในรูปสารประกอบเลดซัลไฟด์ เลดซัลเฟต สินแร่ที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ galena (PbS), cerussite ($PbCO_3$), และ anglesite ($PbSO_4$) ซึ่งมีตะกั่วประมาณ 86.6, 83.4 และ 73.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนสินแร่อื่นๆ ที่มีตะกั่ว ได้แก่ curite ($Pb_6U_5O_{17}4H_2O$), phosgenite ($Pb_2Cl_2CO_3$) และ lanarkite (Pb_2SO_3) เป็นต้น (Berman, 1980; Reilly, 1980) จากการศึกษาพบว่าในดินธรรมชาติจะมีตะกั่วอยู่ประมาณ 50 พีพีเอ็ม (Beavington, 1975) ในน้ำมีตะกั่วประมาณ 13.1 ไมโครกรัมต่อลิตร (Reilly, 1980) ในดินตะกอนมีตะกั่วประมาณ 20 ไมโครกรัมต่อกรัม (Brook, 1979) ในดินตะกอนจะมีปริมาณตะกั่วมากกว่าในน้ำเนื่องจากดินมี humic substances ที่สามารถดึงโลหะตะกั่วจาก insoluble salts ของตะกั่วได้ เช่น โลหะซัลไฟด์ โลหะคาร์บอเนต เป็นต้น (Rashid and Leonard, 1973)

2.3 การนำมาใช้ประโยชน์

มนุษย์ได้นำตะกั่วมาใช้นานแล้ว โดยใช้ประโยชน์ในรูปสินแร่ตะกั่วโดยตรง แต่ในปัจจุบันตะกั่วถูกนำมาใช้ประโยชน์ใน 2 รูปแบบคือ รูปของโลหะ และในรูปสารประกอบทางเคมี (Moore *et al.*, 1977) ได้แก่ ใช้ขั้วไฟฟ้าทำแบตเตอรี่ สายเคเบิล ตัวพิมพ์ ฟิล์ม ลูกรัง ไม้ขีดไฟ ระเบิด ใช้ในการบัดกรี ใช้เป็นเม็ดสีในการทำเซรามิก ใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว ใช้เป็นส่วนประกอบในสีป้องกันสนิม ทำหลอดโทรทัศน์ และใช้ tetraethyl lead เติมในน้ำมันเบนซิน เพื่อป้องกันการน็อกของเครื่องยนต์ นอกจากนี้ตะกั่วยังถูกนำมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมอื่นมากมาย ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับโลหะหนักตัวอื่นๆ เช่น แมงกานีส แคดเมียมแล้ว ตะกั่วจะมีการนำมาใช้ประโยชน์

ในปริมาณที่มากกว่า (กองตรวจโรงงาน, 2527 ; พิมล และ ชัยวัฒน์, 2525) นั่นคือมนุษย์ได้นำตะกั่วมาใช้ในปริมาณมาก คือ ประมาณปีละ 3,000,000 ตัน โดยใช้ในรูปโลหะ 40 เปอร์เซ็นต์ โลหะผสม 25 เปอร์เซ็นต์ และรูปสารประกอบ 35 เปอร์เซ็นต์ (Commission of the European Communities, 1973)

2.4 การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม

ตะกั่วสามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้จากการพังทลายของเปลือกโลก การสลายตัวของหินต้นกำเนิด และการนำตะกั่วมาใช้อย่างแพร่หลายโดยไม่มีการควบคุม เป็นผลให้มีตะกั่วเจือปนในสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก สารตะกั่วจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงจะออกมาในรูปอนุภาคของเกลืออนินทรีย์ของตะกั่ว และฟุ้งกระจายในบรรยากาศ บางส่วนจะปนเปื้อนในดินข้างถนน เมื่อฝนตกก็จะชะล้างเอาสารตะกั่วเหล่านี้ไหลลงสู่แหล่งน้ำต่างๆ ได้ (Harrison and Laxen, 1981) โดยทั่วไปปริมาณตะกั่วจากดินและพืชจะเป็น exponential function กับระยะห่างจากถนน ซึ่งหมายความว่า ปริมาณตะกั่วจะมากในบริเวณใกล้ถนน และจะลดลงจนเกือบคงที่ไม่ว่าจะห่างถนนไปมากเท่าไร สำหรับดินที่ทำการเกษตรที่มีการใช้ปุ๋ยและยาปราบศัตรูพืชพบว่า มีปริมาณตะกั่วสูงถึง 200 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Smith, 1975)

Dong *et al.* (1983) กล่าวว่า ตะกั่วสามารถเกาะรวมตัวกับดินตะกอนได้ทั้งชนิด sand silt และ clay แต่จะอยู่ในรูป clay มากที่สุด แหล่งน้ำโดยทั่วไปจะมีปริมาณตะกั่วปะปนอยู่ในดินตะกอนเสมอ เนื่องจากพื้นที่ที่รองรับแหล่งน้ำนั้นมักประกอบไปด้วยหิน ดิน และแร่ธาตุที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบโดยธรรมชาติอยู่แล้ว และเมื่อมีการชะล้างพังทลายของดินและหินเหล่านั้น ตะกั่วก็จะถูกพัดพาลงสู่แหล่งน้ำและเกิดการตกตะกอนสะสมรวมตัวในแหล่งน้ำนั้น ปริมาณตะกั่วในดินตะกอนจะมีค่ามากกว่าปริมาณตะกั่วในดินและปริมาณตะกั่วในน้ำในบริเวณลุ่มน้ำนั้นเสมอ โดยเฉพาะในพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งปริมาณตะกั่วที่พบในดินตะกอนจะมีมากกว่าปริมาณตะกั่วที่ตรวจพบในน้ำจากแหล่งน้ำเดียวกันหลายเท่า เนื่องจากตะกั่วมีประจุเป็นบวก ซึ่งสามารถเกาะยึดกับดินตะกอน (clay) ที่มีประจุลบได้ดี (เกษม, 2524)

ในบรรยากาศพบว่า ตะกั่วที่เจือปนอยู่เกิดจากการปะทุของภูเขาไฟ ไฟป่า และถั่วที่เกิดจากการสลายตัวของธาตุเรดอนและตะกั่วกัมมันต์ (Pb^{210}) (Ewing and Pearson, 1974) ซึ่งมีการประมาณว่าตะกั่วในอากาศจะตกลงมายังพื้นโลก 1-2 ไมโครกรัม/ปี/ชม.2 (Committee on Biological Effects of Atmospheric Pollutants, 1972) สำนักงานป้องกันสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา ได้ให้ความเห็นว่า ระดับตะกั่วในอากาศที่มีปริมาณมากกว่า 2 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร เป็นระดับที่เสี่ยงต่อการเป็นอันตรายต่อสุขภาพ และการกระทำของมนุษย์ แหล่งชุมชนเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของตะกั่วสู่แหล่งน้ำ โดยการทิ้งสิ่งปฏิกูล ขยะมูลฝอยลงสู่แหล่งน้ำ (Williams *et al.*, 1975)

2.5 การกระจายของตะกั่วในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของพืช

ปริมาณตะกั่วในพืชมีความผันแปรอย่างมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยสภาพแวดล้อม เช่น ปริมาณตะกั่วในดิน การเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล และพันธุ์พืชที่มีความสามารถในการสะสมตะกั่ว โดยส่วนรากของพืชสามารถดูดตะกั่วในดินในรูปที่ละลายน้ำได้เป็นจำนวนมาก (Pendias and Pendias, 1992) ในพืชน้ำ การได้รับพิษจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและเคมี รวมทั้งรูปทางเคมีของตะกั่ว ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ และความกระด้างของน้ำ ธาตุอาหาร และสารแขวนลอยในน้ำ ตะกั่วในน้ำเข้าสู่พืชในรูปของไอออน โดยพืชน้ำจะดูดซับตะกั่วจากน้ำ ดิน อากาศ หรือรวมกันหลายๆ ทาง ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช (Hoffman *et al.*, 1995) และในพืชบกนั้น ปริมาณตะกั่วที่สะสมในพืชจะเกี่ยวข้องกับปริมาณของตะกั่วในบรรยากาศ ขนาดของอนุภาค ภูมิประเทศ ภูมิอากาศ และลักษณะพื้นผิวของพืช รวมทั้งสมบัติของดินเป็นสำคัญ โดยพบว่าในดินที่มีการระบายน้ำแล้ว พีเอชต่ำ มีเหล็กออกไซด์และฟอสฟอรัสต่ำ มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตน้อย มี chelating agent เช่น Ethylenediamine tetraacetic acid พืชจะมีการดูดกินตะกั่วได้เพิ่มขึ้น (John and Laerthoven, 1972 ; Rains, 1975 ; Hoffman *et al.*, 1995) และในบรรดาธาตุโลหะหนักด้วยกัน เมื่อเรียงตามความสามารถในการดูดกินโดยรากพืช จากมากไปน้อยตามลำดับดังนี้ เหล็ก ตะกั่ว ทองแดง นิเกิลกับสังกะสี และโคบอลต์ จะเห็นได้ว่าตะกั่วจะถูกดูดกินโดยรากพืชได้มากกว่าเหล็กเท่านั้น (Puckett *et al.*, 1973) ปริมาณตะกั่วที่รากดูดแล้วเคลื่อนย้ายสู่ลำต้นพบว่า ตะกั่วในส่วนต่างๆ ของลำต้นมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ จะตกตะกอนอยู่ที่ผนังเซลล์ และส่วนที่เหลือจะพบภายในเซลล์ (Tornbene and Edward, 1972)

Zimdahl and Skogerboe (1977) ได้ทำการทดลองการสะสมปริมาณตะกั่วในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของข้าวโพด โดยปลูกข้าวโพดในดินที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 300 ppm พบว่า เพียง 3 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณตะกั่วในรากจะถูกเคลื่อนย้ายไปยังส่วนลำต้นพืช และในส่วนของรากมีการสะสมตะกั่วมากที่สุด รองลงมาคือ ขั้ว ใบ ลำต้น และฝัก ตามลำดับ

จากการศึกษาของ วรกาย (2542) พบว่า เมื่อนำเอาภาคตะกอนน้ำเสียที่มีปริมาณตะกั่วปนเปื้อนอยู่ 69.9 พีพีเอ็ม มาทดลองปลูกพืช 3 ชนิด คือ ผักบุ้ง มะเขือเปราะ และมันเทศ และเมื่อนำส่วนต่างๆ ของพืชหลังปลูกมาวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วก็พบว่า ปริมาณตะกั่วในส่วนเหนือดินของพืชจะสูงกว่าในส่วนใต้ดิน ซึ่งในผักบุ้ง มะเขือเปราะ และมันเทศ ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยเท่ากับ 1.9, 10.8 และ 8.5 พีพีเอ็ม ในขณะที่ส่วนรากจะมีปริมาณตะกั่วเฉลี่ยเท่ากับ Tr, Tr และ 5.4 พีพีเอ็ม ตามลำดับ สำหรับผักบรืโภคผล เช่น มะเขือเปราะนั้น ปริมาณตะกั่วส่วนใบและลำต้นจะไม่เคลื่อนย้ายไปยังผล เพราะไม่สามารถตรวจสอบตะกั่วในผลได้

ปกติตะกั่วจะมีหลายรูป สารประกอบของตะกั่วบางรูปละลายน้ำได้ บางรูปละลายน้ำไม่ได้ ซึ่งรากพืชจะดูดสารตะกั่วได้เฉพาะส่วนที่ละลายน้ำได้เท่านั้น และรูปของตะกั่วไม่ใช่องค์ประกอบเดียวที่จะพิจารณาว่าพืชนำไปใช้ได้หรือไม่ อย่างไรก็ตามมีหลักฐานว่าตะกั่วในรูปคาร์บอเนต ซึ่งไม่ละลายน้ำอาจถูกจำกัดการเคลื่อนย้ายจากรากพืชไปยังส่วนบนของพืช (John and Laerhoven, 1972) และถึงแม้ว่าปริมาณของตะกั่วในพืชจะสูงขึ้นตามความเข้มข้นของตะกั่วในดิน แต่สัดส่วนของการเพิ่มขึ้นจะแตกต่างกัน กระทรวงเกษตร อาหาร และการประมงของประเทศญี่ปุ่น ได้ตรวจสอบความเข้มข้นของตะกั่วในพืชที่มีการเจริญเติบโตในดินต่างกัน และพบว่าในดินที่มีค่าความเข้มข้นของตะกั่วสูงกว่าค่าปกติถึง 25 เท่า นั้น ความเข้มข้นของตะกั่วในพืชเพิ่มขึ้นไม่ถึง 2 เท่า (MAFF, 1982)

2.6 ปฏิกริยาในดิน

ตะกั่วในดินมีอยู่หลายรูปขึ้นกับองค์ประกอบของวัตถุต้นกำเนิดและปฏิกริยาของสารประกอบนั้นๆ โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ และที่ละลายน้ำได้เล็กน้อย เช่น $PbCO_3$, $PbSO_4$ และ Lead organic matter complexes (Stewart *et al.*, 1973) สินแร่ตะกั่วในธรรมชาติ เช่น กาลีนนา (galena) เมื่อสลายตัวจะได้ออกซิไดส์อย่างช้าๆ ให้อยู่ในรูปคาร์บอเนตหรือถูกตรึงโดยแร่ดินเหนียว ออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม และอินทรีย์วัตถุ โดยทั่วไปตะกั่วอยู่ในรูป Pb^{2+}

มากกว่า Pb^{4+} และมีนิสัยคล้ายกลุ่มโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท ดังนั้นจึงสามารถเข้าแทนที่ K, Ba, Sr และ แม้แต่ Ca ในแร่และในตำแหน่งที่ไอออนของธาตุเหล่านี้ถูกดูดซับ

ตะกั่วเป็นธาตุโลหะหนักที่มีสภาพเคลื่อนที่ได้น้อยที่สุด สภาพการละลายได้จะลดลงอย่างมากโดยการใส่ปูน ในดินพีเอชสูงตะกั่วจะตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ ฟอสเฟต หรือ คาร์บอเนต หรือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์และมีความเสถียรค่อนข้างมาก การเพิ่มความชื้นในดิน ทำให้สภาพละลายได้ของตะกั่วเพิ่มขึ้นได้บ้าง นอกจากนั้น ปริมาณการสะสมของตะกั่วในดินบนสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่ไม่มีการไถพรวน ดังนั้น ดินที่มีตะกั่วปนเปื้อนอินทรีย์วัตถุในดินบนจึงเป็นแหล่งสะสมตะกั่วที่สำคัญ ตะกั่วอาจเกิดปฏิกิริยาเมทิลเลชันได้ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ทั้งแบบชีวภาพหรือเป็นปฏิกิริยาเคมีล้วนๆ (สุกมาศ, 2545)

2.6 ความเป็นพิษ

ตะกั่วเป็นธาตุที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์ สัตว์ รวมทั้งพืช ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางอาหาร การหายใจ และทางผิวหนังเมื่อเป็นแผล รูปแบบของสารตะกั่วซึ่งอยู่ในรูปสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์นั้น พบว่ารูปที่เป็นสารอินทรีย์จะเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนังและระบบทางเดินหายใจ ส่วนรูปสารอนินทรีย์จะเข้าสู่ร่างกายโดยการกินและระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากตะกั่วมีลักษณะคล้ายกับ Ca^{2+} เมื่อเข้าสู่ร่างกายจึงมักอยู่ร่วมกับ Ca^{2+} ถ้าร่างกายมีการนำ Ca^{2+} ที่มีตะกั่วผสมอยู่ไปใช้ในภาวะที่จำเป็นก็จะก่อให้เกิดอันตรายได้ (เปี่ยมศักดิ์, 2529 ; กุลยา, 2534) เมื่อตะกั่วถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายมนุษย์และสัตว์แล้วจะสามารถสะสมในโลหิต กระดูก ฟัน เล็บ ผม กล้ามเนื้อ น้ำเหลือง (Committee on Lead in the Human Environment, 1980) โดยจะสะสมในกระดูกมากที่สุด และจะสะสมในร่างกายมนุษย์ได้นานถึง 16-27 ปี (สุกมาศ, 2545) สารตะกั่วจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายของเด็กได้ดีกว่าผู้ใหญ่ โดยเฉพาะในขณะกระเพาะอาหารว่าง (Harrison and Laxen, 1981) ถ้าร่างกายได้รับตะกั่วในปริมาณสูงอย่างฉับพลัน คือมากกว่า 0.8 มิลลิกรัม จะทำให้เกิดพิษเฉียบพลัน มีอาการปวดท้องรุนแรง ท้องร่วงอย่างแรง กล้ามเนื้อ ตับ ไต หัวใจล้มเหลว ถึงตายได้ อาการเหล่านี้ส่วนใหญ่จะพบในเด็ก แต่ผู้ใหญ่พบน้อยมาก สำหรับอาการเรื้อรังของตะกั่วจะทำให้เกิดโรคโลหิตจาง เนื่องจากตะกั่วไปขัดขวางการสร้างฮีโมโกลบิน โดยจะไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์บางชนิดที่มีหมู่-SH อยู่ด้วย เช่น โคเอนไซม์ เอ และทำให้เกิดโรคประสาทได้ (Hammond and Beliles, 1980 ; พิมล และ ชัยวัฒน์, 2525) เมื่อตะกั่วในเลือดมากกว่า 70 ไมโครกรัม

ต่อ 100 มิลลิลิตร จะเสี่ยงต่อการเกิดโรคประสาท ก่อให้เกิดความผิดปกติของโครโมโซมที่ต่อมน้ำเหลือง ทั้งยังก่อให้เกิดเนื้องอกและมะเร็ง (Popovac *et al.*, 1982) William (1967) รายงานว่าตะกั่วสามารถเข้าไปแทนที่แมงกานีสในระบบเอนไซม์ ATP-ase และสามารถเข้าไปแทนที่สังกะสีในระบบเอนไซม์ Carboxypeptidase เอนไซม์ Dehydrogenase เอนไซม์ Carbonic Anhydrase ซึ่งมีผลให้เอนไซม์ดังกล่าวสูญเสียการทำงานไป ทั้งนี้เพราะไอออนของตะกั่วมีโครงสร้างคล้ายไอออนของแคลเซียม จึงสามารถเข้าไปแทนที่แคลเซียมในระบบประสาทและในไมโทคอนเดรียในระบบเซลล์ได้ ทำให้เกิดการลดลงของผลผลิต ATP และการเสื่อมหน้าที่ของระบบเซลล์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจะเกิดผลกระทบกับการสื่อสารประสาท (synaptic transmission) (Cooper *et al.*, 1984)

ในปี ค.ศ. 1960-1970 มีอุบัติการณ์เนื่องจากสารตะกั่วในสีทาบ้านที่กรุงเม็กซิโกซิตี ทำให้มีผู้ป่วยหลายพันคน อาการของโรคคือโลหิตจางและภาวะจิตผิดปกติ ตรวจพบตะกั่วในผู้ป่วยสูงถึง 350 ไมโครกรัม/ลิตร ซึ่งปริมาณปกติควรมีระดับเพียง 75 ไมโครกรัม/ลิตร สำหรับประเทศไทย ก็พบอุบัติการณ์เกี่ยวกับตะกั่ว เมื่อปี พ.ศ. 2519 ที่หมู่บ้านพระประแดง มีเด็กเสียชีวิตหลายราย เนื่องจากได้รับสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายมากเกินไป สาเหตุเพราะหมู่บ้านดังกล่าวได้นำเอาขี้เถ้าของโรงงานหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่ของรถยนต์เก่าๆ มาถมในหมู่บ้าน จึงทำให้พืชผัก น้ำดื่ม น้ำใช้บริเวณนั้นมีสารตะกั่วเจือปน จึงส่งผลทำให้เด็กเกิดโรคโลหิตจางอย่างรุนแรง เกิดโรคทางระบบประสาท เด็กหลายคนเสียชีวิตในอีก 2 ปีต่อมา จากการตรวจวิเคราะห์ดินในบริเวณหมู่บ้านพบว่า มีตะกั่วสูงถึง 3,900 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สูงมาก (ประชา, 2534)

ระดับปกติของตะกั่วในพืชคือ 0.5-3 พีพีเอ็ม ส่วนระดับที่เป็นพิษจะแตกต่างกันไปในแต่ละชนิดพืชและความอุดมสมบูรณ์ของดินด้วย (Goodbold and Huttermann, 1986) สำหรับความเป็นพิษของตะกั่วที่มีต่อพืชนั้น อำนวย (2528) ได้ศึกษาอิทธิพลของตะกั่วในแอคติเวตเตดสตัคซ์ที่มีต่อการเจริญเติบโตของข้าว พบว่า ตะกั่วในอัตรา 1-100 พีพีเอ็ม ไม่ทำให้ความสูงและการแตกกอของข้าวแตกต่างกันในทางสถิติ แต่ที่ระดับตะกั่ว 1,000 พีพีเอ็ม มีผลทำให้ต้นข้าวตาย ส่วนผลกระทบที่มีต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งนั้น พบตั้งแต่ระดับตะกั่ว 10 พีพีเอ็ม และเพิ่มขึ้นที่ 100 พีพีเอ็ม ส่วนที่ 1,000 พีพีเอ็ม นั้น พบว่าส่งผลกระทบต่อข้าวมากจนทำให้ต้นข้าวตาย และ อรรพรรณ (2522) รายงานว่าหญ้าขนซึ่งเป็นพืชอาหารสัตว์ชนิดหนึ่งนั้น สามารถทนความเป็นพิษของตะกั่วที่ระดับ 100 พีพีเอ็ม โดยไม่กระทบต่อการเจริญเติบโต ส่วน Shirley (1978) รายงานว่าระดับของตะกั่วที่มีพิษในอาหารหยาบสำหรับโคนนั้นมีตั้งแต่ 200-350 มิลลิกรัม/หญ้า 1 กิโลกรัม

ผลการศึกษาพิษของตะกั่วที่มีต่อผู้ย่อยสลาย พบว่าตะกั่วมีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน โดยการจำกัดการทำงานของระบบเอนไซม์ ทำให้การสลายตัวของอินทรีย์วัตถุเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอินทรีย์สารที่สลายตัวได้ยาก เช่น เซลลูโลส นอกจากนั้นอาจมีผลทำให้ไนโตรเจนในดินสะสมในรูปไนเตรตในดินที่มีค่า CEC สูงหรือต่ำในระยะยาว (ศุภมาส, 2545)

3. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแคดเมียม

3.1 ลักษณะและสมบัติ

แคดเมียมเป็นธาตุในหมู่ 2B มีเลขอะตอม 48 เลขมวล 112.4 มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่อุณหภูมิ 767 องศาเซลเซียส มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 2 และมีไอโซโทปที่เสถียร 8 ไอโซโทป แคดเมียมเป็นโลหะอ่อน สีขาวเงิน ดัดและตีแผ่ได้ แคดเมียมบางรูปละลายน้ำได้ และละลายได้ในกรด โดยเฉพาะกรดไนตริก และละลายได้มากในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรด (สิทธิชัย, 2528 ; Parker, 1993) แคดเมียมเป็นธาตุที่เกิดขึ้นในธรรมชาติเช่นเดียวกับสังกะสี จึงมีสมบัติทางเคมีและกายภาพคล้ายคลึงกัน แต่แคดเมียมมีความเป็นพิษสูง ไม่สลายตัวในสิ่งแวดล้อม แต่เปลี่ยนรูปได้ในดิน หิน และปุ๋ยจากดินแร่ (mineral fertilizer) (Top 20 Hazardous Substances, 1999) ในธรรมชาติแคดเมียมมักจะอยู่รวมกับกำมะถันเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ และมักปนอยู่ในสินแร่สังกะสี ตะกั่ว หรือทองแดง แคดเมียมที่อยู่ในแร่จะอยู่ในรูปของสารประกอบ เช่น แคดเมียมคลอไรด์ แคดเมียมออกไซด์ แคดเมียมซัลเฟต แคดเมียมซัลไฟด์ เป็นต้น (พรรณทิพย์, 2545)

3.2 แหล่งกำเนิด

ในธรรมชาติจะพบแคดเมียมในปริมาณที่น้อยกว่าโลหะหนักชนิดอื่นๆ โดยจะพบอยู่ในรูปของสินแร่ Greenockite (CdS) ประมาณ 0.5 ไมโครกรัม/กรัม และปะปนอยู่กับแร่อื่นๆ เช่น สังกะสี ตะกั่ว ทองแดง แหล่งสำคัญที่แคดเมียมปะปนอยู่ส่วนใหญ่อยู่ในหินฟอสฟอไรต์ คือ 0-170 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (อรรวรณ, 2522) และพบแคดเมียมอยู่ในรูปสินแร่สังกะสีประมาณร้อยละ 0.3-1.0 (สิทธิชัย, 2528 ; Chizhikov, 1966 ; Fassett, 1980) และอาจมากถึงร้อยละ 3 เช่น ปะปนอยู่กับสินแร่ Sphalerite (ZnS) หรือ Calamine (ZnCO₃) (ศุภมาส, 2545) ในเปลือกโลก หินแกรนิตและหินบะซอลต์จะมีแคดเมียมปนอยู่ประมาณ 0.2 พีพีเอ็ม (Taylor *et al.*, 1964) สิทธิชัย (2528)

รายงานว่าหินตะกอนมีแคดเมียมอยู่ 2-10 พีพีเอ็ม และกล่าวว่าดินที่ได้จากการสลายตัวของหินอัคนีจะมีแคดเมียมประมาณ 0.1-0.3 พีพีเอ็ม ดินที่ได้จากการสลายตัวของหินตะกอนมีแคดเมียมประมาณ 0.3-11 พีพีเอ็ม และดินที่ได้จากการสลายตัวของหินแปรมีแคดเมียมประมาณ 0.1-1 พีพีเอ็ม โดยปริมาณแคดเมียมในดินตะกอนและน้ำจะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะการกำเนิดดิน สภาวะแวดล้อม ค่าความเป็นกรด-ด่าง ดินที่เกิดจากหินตะกอนจะมีแคดเมียมสูงกว่าดินที่เกิดจากหินอัคนีและหินแปร ดินเหนียวและดินที่มีเบสสูงจะดูดซับแคดเมียมในรูปคาร์บอเนตที่ละลายน้ำได้มาก ส่วนดินทรายและดินที่เป็นกรดจะดูดซับแคดเมียมได้น้อยกว่า (Zievers and Novotny, 1974 ; Berman, 1980 ; Reilly, 1980 ; Chizhikov, 1966)

3.3 การนำมาใช้ประโยชน์

แคดเมียมในธรรมชาติถูกนำมาใช้ประโยชน์โดยการทำเหมืองแร่แคดเมียมและแคดเมียมบางส่วนเป็นผลพลอยได้จากการถลุงแร่สังกะสี มนุษย์ได้นำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน ทั้งในด้านการเกษตรและอุตสาหกรรม ในปี ค.ศ. 1975 ทั่วโลกมีการใช้แคดเมียมเป็นปริมาณ 15,550 ตัน และในปี ค.ศ. 2000 มีการใช้แคดเมียมเพิ่มขึ้นเป็น 20,000 ตัน (Pendias and Pendias, 1992) โดยด้านการเกษตรถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารฆ่าวัชพืช สารฆ่าเชื้อรา และเป็นส่วนผสมในการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต ทางด้านอุตสาหกรรม แคดเมียมถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสีทาบ้าน สีชุบโลหะเพื่อป้องกันการผุกร่อน ทำหน้าที่เป็น stabilizer ในอุตสาหกรรมพลาสติก แคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟซีลีไนต์ใช้เป็นสารที่ทำให้เกิดสีเหลือง และสีแดง ในอุตสาหกรรมสีและพลาสติก ใช้ในเซลล์สุริยะ ใช้ทำเซลล์ไฟฟ้าแบบ Cd-Ni ซึ่งใช้ในรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า เป็นโลหะผสมกับอลูมิเนียม โปรท แมกนีเซียม นิกเกิล แพลตตินัม เป็นต้น ซึ่งจะนำไปทำทองเครื่องป้องกันไฟ เบ้าหลอม ส่วนประกอบของรถยนต์ แบตเตอรี่ โลหะบัดกรี ลวดโทรศัพท์ แคดเมียมยังถูกใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยโลหะที่ชุบแล้วจะนำไปใช้ทำตะปู น็อต แหนบ เป็นต้น (สิทธิชัย, 2528; พิมล และ ชัยวัฒน์, 2525; Rayan, 1978; Elinder, 1982)

3.4 การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม

แคดเมียมแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมจากการระเบิดของภูเขาไฟ หายนาน้ำฟ้า และการพังทลายของหินต้นกำเนิดดิน แต่โอกาสที่แคดเมียมจะปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการกระทำของธรรมชาติดังกล่าวมีน้อยกว่าการกระทำของมนุษย์ ซึ่งมีผลต่อการแพร่กระจายของแคดเมียมใน

บรรยากาศ ดิน พืช แหล่งน้ำ ทะเล และมหาสมุทร (McNeely *et al.*, 1979 ; Singh and Subramanian, 1978) แคลเมียมที่กระจายอยู่ในอากาศส่วนใหญ่มักจะอยู่ในรูปของไอแคลเมียม ซึ่งมาจากการถลุงหรือหลอมโลหะ มนุษย์มีโอกาสได้รับไอแคลเมียมในอากาศเข้าไปโดยตรงน้อยมาก แต่ไอแคลเมียมเคลื่อนที่ไปได้ไกลและตกลงสู่ดินและน้ำ แล้วถูกพืชดูดไปสะสมได้ (สิทธิชัย, 2528) นอกจากนี้ยังมีการคำนวณการตกสะสมในชั้นบรรยากาศของโลหะหนักที่มีต่อผิวดินด้วย ซึ่งพบว่าค่าเฉลี่ยของแคลเมียม คือ 20 กรัม/ เฮกตาร์/ปี และพบว่าปริมาณแคลเมียมในบรรยากาศนั้นจะแตกต่างกันไปในแต่ละที่ (Pendias and Pendias, 1992)

แคลเมียมที่แพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมจะยังคงอยู่ในสิ่งแวดล้อมเพียงแต่มีการย้ายจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง และมีผลต่อการสะสมอยู่ ณ ที่ใดที่หนึ่ง เช่น ในดิน ในสิ่งมีชีวิต (กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2532)

แคลเมียมในแหล่งน้ำอยู่ในรูปคอลลอยด์ หรือสารละลาย อนุภาคดินเหนียวทำให้ปริมาณแคลเมียมในแหล่งน้ำสูงขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแคลเมียมในแหล่งน้ำ คือ ลักษณะทางกายภาพและเคมีของสิ่งมีชีวิตในน้ำ แหล่งมลพิษ ปริมาณน้ำในแหล่งน้ำ (Brams and Anthony, 1983 ; Ahlf, 1988 ; Van der Zee *et al.*, 1988) ปริมาณแคลเมียมในดินตะกอนเป็นส่วนสำคัญโดยตรงกับปริมาณสารอินทรีย์ที่สูญหายไปเป็นดินตะกอน โคลนซึ่งมีอิทธิพลประกอบอยู่และเป็นส่วนสำคัญในการดูดซับแคลเมียมด้วย กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการสำคัญที่จะลดปริมาณแคลเมียมในแหล่งน้ำได้ โดยการเคลื่อนย้ายไปสะสมในดินตะกอน แต่แคลเมียมในดินตะกอนสามารถออกมาสู่แหล่งน้ำได้เมื่อความเค็มของน้ำเพิ่มขึ้น การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ดินสามารถลดความเข้มข้นของแคลเมียมในดินได้ (Francis and Dodge, 1988 ; Hirsch and Banin, 1990) นอกจากนั้นแคลเมียมในแหล่งน้ำที่อยู่ในรูปซัลเฟตและคลอไรด์จะละลายน้ำได้ดี แต่เมื่อแตกตัวเป็นไอออนแล้วไปพบกับซัลไฟด์ไอออนเข้าก็จะทำปฏิกิริยาทางเคมีแล้วตกตะกอนอยู่ในรูป Greenochite ซึ่งมีมากในบริเวณ reduction zone (สิทธิชัย, 2528) Sandstead *et al.* (1974) รายงานว่าในการดื่ม น้ำ 1.5 ลิตร/วัน ร่างกายจะได้รับแคลเมียมจากน้ำ ในพิสัยน้อยกว่า 1 ไมโครกรัม ถึง 45 ไมโครกรัม ขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5 ไมโครกรัม/วัน และในแหล่งน้ำธรรมชาติมีแคลเมียมปนเปื้อนอยู่ในพิสัย 0.5-14.6 ไมโครกรัม/ลิตร (สิทธิชัย, 2528)

การสะสมแคดเมียมในดินบนได้มาจากแหล่งปนเปื้อนที่สำคัญคือ เหมืองแร่ตะกั่วและสังกะสี กากตะกอนน้ำโสโครก และปุ๋ย โดยเฉพาะปุ๋ยหินฟอสเฟต (Taylor *et al.*, 1964) โดยปริมาณแคดเมียมในระดับปกติในดินคือ 0.1-2 พีพีเอ็ม และปริมาณแคดเมียมที่ถือเป็นค่าวิกฤติในดินที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ คือ 1-3 พีพีเอ็ม จากการรวบรวมข้อมูลแคดเมียมในประเทศต่างๆ ของศุภมาส (2545) ปรากฏว่าปริมาณแคดเมียมในดินโดยทั่วไปมีค่าเฉลี่ย 0.07-1.0 พีพีเอ็ม โดยในดินฮิสโตซอลล์มีค่าเฉลี่ยสูง (ตารางที่ 1) และค่าเฉลี่ยแคดเมียมของดินโดยทั่วไปมีค่า 0.53 พีพีเอ็ม

3.5 การกระจายของแคดเมียมในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของพืช

ปริมาณแคดเมียมในพืชทั่วไปมีค่าต่ำ แต่จะมีค่าสูงในพืชบางชนิด พืชกินใบหรือพืชหัวบางชนิดจึงเป็นตัวนำแคดเมียมสู่มนุษย์ เมื่อดินที่เพาะปลูกมีการปนเปื้อน แคดเมียมจะมีการสะสมที่รากมากที่สุด รองลงมาคือสะสมในใบและมีการเคลื่อนย้ายสู่เมล็ดได้น้อย (ศุภมาส, 2545)

วรกาย (2542) ได้ทำการศึกษาโดยนำเอากากตะกอนน้ำเสียมาผสมกับดินในอัตราส่วนต่างๆ แล้วปลูกพืช 3 ชนิด ได้แก่ ผักบุ้ง มั่นเทศ และมะเขือเปราะ จากการศึกษาพบว่ามีการปนเปื้อนแคดเมียมอยู่ในพืช 0.20-2.20 พีพีเอ็ม ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อพืชปลูก แต่มีแคดเมียมเข้าไปสะสมในพืชได้มากขึ้น โดยสะสมในส่วนเหนือดินมากกว่าส่วนใต้ดินดังนี้คือ มีแคดเมียมสะสมอยู่ในส่วนเหนือดินของผักบุ้ง มะเขือเปราะ และมันเทศอยู่ในพืช Tr-1.979, 0.209-1.000 และ 0.237-0.500 พีพีเอ็ม แต่มีแคดเมียมสะสมในส่วนใต้ดินอยู่ในพืช Tr-1.209, Tr และ 0.125-0.250 พีพีเอ็ม ตามลำดับ แต่ในมะเขือเปราะนั้นไม่สามารถตรวจสอบแคดเมียมในส่วนของผลได้ (Tr)

ปรีดา และคณะ (2547) ได้รายงานปริมาณสารแคดเมียมที่สะสมในพืชชนิดต่างๆ และส่วนของพืชซึ่งปลูกในดินของประเทศไทย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปริมาณแคลเซียมในดินบนชนิดต่างๆ (พีพีเอ็ม)

ชนิดดิน	ค่าเฉลี่ย	พิสัย	ประเทศ
พอดซอลส์ และดินเนื้อหยาบ	0.21	0.08-0.47	อเมริกา
	0.07	0.01-0.24	โปแลนด์
	0.43	0.10-1.80	แคนาดา
ดินร่วนถึงดินเหนียว	0.27	0.08-0.55	อเมริกา โปแลนด์
	0.64	0.12-1.61	แคนาดา
อิสโตซอลส์ และดินอินทรีย์อื่น	0.72	0.36-1.44	อเมริกา แคนาดา
			สหราชอาณาจักร
ดินต่างๆ	1	0.27-4.00	สหราชอาณาจักร
	0.45	0.03-2.53	ญี่ปุ่น
	n.a.	0.41-0.57	อเมริกา

ที่มา : ศุภมาส (2545)

ตารางที่ 2 ปริมาณสารแคดเมียมที่สะสมในพืชชนิดต่างๆ และส่วนของพืชที่ปลูกในดินของประเทศไทย

พืช/ผัก	แคดเมียมในพืช (มก./กก.)
ข้าวกล้อง	0.002-0.156
ข้าวโพด	0.002-0.04
มันสำปะหลัง	0.001-0.006
หอมใหญ่	0.034-0.482
ผักกาดขาว	0.15
ผักคะน้า (ใบ)	1.53
ผักคะน้า (ราก)	3.37
ผักกาดหอม	0.05
ผักบุ้ง	0.16

ที่มา : ปรีดา และคณะ (2547)

3.6 ปฏิกริยาในดิน

แคดเมียมในหินอัคนีและหินตะกอนจะมีปริมาณไม่เกิน 0.3 พีพีเอ็ม และจะพบอยู่ร่วมกับสังกะสีเสมอ แต่ในสภาพดินเป็นกรดนั้น แคดเมียมจะมีสภาพเคลื่อนที่ดีกว่าสังกะสี และแคดเมียมมีรูปสารประกอบได้เช่นเดียวกับกลุ่มแคดไอออน Zn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+}

ในการสลายตัวของหินและแร่ แคดเมียมในดินอยู่ในสภาพละลายได้ง่ายโดยจะอยู่ในรูป Cd^{2+} เป็นส่วนใหญ่ โดยอาจอยู่ในรูปไอออนเชิงซ้อน (complex ion) และสารประกอบดังนี้

แคดไอออน : $CdCl^+$, $CdOH^+$, $CdHCO_3^+$

แอนไอออน : $CdCl_3^-$, $CdCl_4^{2-}$, $Cd(OH)_3^-$, $Cd(OH)_4^{2-}$

สารประกอบ : CdO , $CdCO_3$

ปัจจัยสำคัญที่สุดที่จะควบคุมสภาพเคลื่อนที่ได้ของแคดเมียมในดินคือ พีเอชและศักย์รีดอกซ์ ซึ่งดินที่มีศักย์รีดอกซ์สูง แคดเมียมจะอยู่ในรูปสารประกอบ เช่น CdO หรือ $CdCO_3$ หรืออาจอยู่รวมกับฟอสเฟตได้เช่นกัน

แคดเมียมเคลื่อนที่ได้ดีในดินที่มีพีเอชระหว่าง 4.5-5.5 ขณะที่ในดินที่เป็นด่าง แคดเมียมจะไม่ค่อยเคลื่อนที่ ในสภาพดินเป็นกรดสภาพละลายได้ของแคดเมียมจะขึ้นอยู่กับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม และปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน

การที่แคดเมียมในตะกอนน้ำโสโครกถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่าย เป็นเพราะไอออนบวก (exchangeable cation) ที่แลกเปลี่ยนได้อื่นสามารถไล่ที่แคดเมียมก่อนที่จะดูดซับในตะกอนได้มากกว่า ประเภทของตะกอนน้ำโสโครกที่สามารถดูดซับแคดเมียมจากมากไปหาน้อยดังนี้ $Ca\text{-sludge} > \text{untreated sludge} > Fe\text{-sludge}$, $Al\text{-sludge}$ ขณะเดียวกันเมื่ออยู่ในดินแคดเมียมโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพที่แลกเปลี่ยนได้ ทำให้ศักยภาพในการเคลื่อนที่และแพร่กระจายของแคดเมียมสูงมาก

แคดเมียมเมื่ออยู่ในกากตะกอนที่เป็นด่าง เช่น $Ca\text{-sludge}$ มีแนวโน้มที่จะอยู่ในลักษณะที่เล็ดหรือรวมกับอินทรีย์สารไม่ละลาย (insoluble organic bound) เป็นส่วนใหญ่ และปริมาณในส่วนนี้จะไม่ถูกกระทบโดยการเปลี่ยนแปลงสภาพออกซิเดชัน-รีดักชันแต่อย่างใด เมื่อ

สภาพความเป็นต่างลดลง เช่น จนถึงสภาพพีเอช 5.0 และอากาศถ่ายเทดี แคลเมียมในดินจะเปลี่ยนจากรูปสารประกอบอินทรีย์ไปอยู่ในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนได้มากขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงศักย์รีดอกซ์และพีเอชในดินมีผลต่อการละลายได้และการแพร่กระจายของแคลเมียมเป็นอย่างมาก (ศุภมาส, 2545)

3.7 ความเป็นพิษ

แคลเมียมเป็นโลหะหนักที่ก่อให้เกิดพิษต่อสิ่งแวดล้อม พิษของแคลเมียมนำความสนใจมาสู่ชาวโลกครั้งแรก โดยเกิดขึ้นที่ริมฝั่งของแม่น้ำจินตซู่ (Jintsu) ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 พบว่าชาวบ้านแถบนั้นเกิดอาการสาวยตาผิดปกติและปวดกระดูกบริเวณท้อง ชี้อกรง และกระดูกสันหลัง ชาวญี่ปุ่นได้เรียกโรคนี้ว่า “Itai-Itai” ซึ่งเป็นเสียงอุทานถึงความเจ็บปวด ผู้หญิงที่คลอดลูกหลายคนและหลังประจำเดือนหมดแล้วจะเป็นโรคนี้มากที่สุด สาเหตุมาจากการได้รับแคลเมียมเข้าสู่ร่างกาย เพราะบริเวณนั้นเป็นที่ทำเหมือง และถลุงโลหะของบริษัทมิตซูบิชิ (ชิระ, 2528)

แคลเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ ปาก ทางจมูกและทางผิวหนัง จากการศึกษาพบว่าประมาณร้อยละ 6 ของแคลเมียมในอาหารจะสะสมในร่างกาย โดยในเด็กเกิดใหม่จะมีแคลเมียมในเนื้อเยื่อน้อยมาก (Reilly, 1980) แคลเมียมที่เข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมที่ทางเดินอาหารต่ำมากเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ Food and Agriculture Organization [FAO] and WHO (1972) และถูกดูดซึมที่ปอด 10-40 เปอร์เซ็นต์ โดยปกติคนจะรับแคลเมียมเข้าสู่ร่างกาย 10-30 ไมโครกรัม/วัน (Reilly, 1980) และประมาณร้อยละ 10 จะถูกขับออกจากร่างกายได้ ส่วนที่เหลือจะถูกหมุนเวียนอยู่ในกระแสเลือดและสะสมที่อวัยวะต่างๆ เช่น ตับ ไต ม้าม ฯลฯ (Nobbs and Pearce, 1976)

แคลเมียมที่เข้าสู่ร่างกายไม่ว่าทางตรงหรือทางอ้อมจะเข้าไปอยู่ในกระแสโลหิต ตับ ไต สมอง และหัวใจ บางส่วนเข้าไปสะสมในกระดูก และฟัน อันตรายที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณที่ร่างกายได้รับ โดยแคลเมียมที่เข้าสู่ร่างกายจะก่อให้เกิดพิษขึ้น 2 ลักษณะ คือ พิษเฉียบพลันและพิษแบบเรื้อรัง อาการพิษแบบเฉียบพลันของแคลเมียมจะมีการปวดศีรษะ เป็นตะคริว และบางครั้งอาจช็อคได้ ส่วนอาการพิษแบบเรื้อรังจะเกิดขึ้นเมื่อร่างกายได้รับแคลเมียมในปริมาณน้อยๆ เป็นระยะเวลานาน โดยจะเกิดอันตรายต่อไต และกระดูก (Elkins, 1963) ถ้ามนุษย์สูดควันออกไซด์ของแคลเมียมจะเป็นอันตรายต่อปอดอย่างฉับพลัน เกิดอาการปอดอักเสบหรือน้ำท่วมปอด (Friberg *et al.*, 1976) เมื่อร่างกายสะสมแคลเมียมเพิ่มขึ้น แคลเมียมจะไปรบกวนเมตาโบลิซึมของ

เหล็ก สังกะสี ทองแดง และฟอสฟอรัส ขัดขวางการทำงานของ sulphydryl enzyme ทำให้เกิดความดันโลหิตสูงและโลหิตจาง ถ้าตับและไตมีแคดเมียมสะสมในปริมาณสูงจะมีโครงสร้างและการทำงานผิดปกติ ทำให้มีโปรตีนปะปนออกมาในน้ำปัสสาวะ นอกจากนั้นแคดเมียมยังทำให้เกิดความผิดปกติที่กระดูก และมีอาการปวดกระดูกรุนแรงที่เรียกว่า โรคิโอไต-อิต (พิมล และ ชัยวัฒน์, 2525 ; Berman, 1980 ; Reilly, 1980)

ความรุนแรงของความเป็นพิษของแคดเมียมที่มีต่อพืชนั้น พบว่าแคดเมียมในปริมาณเพียงเล็กน้อย คือ 1-10 พีพีเอ็ม จะมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช (Francis, 1994) จากการรายงานของศิริพร (2527) ซึ่งได้ศึกษาผลกระทบของแคดเมียมในแอคติเวตเตดส์ลัคส์ที่มีต่อการเจริญเติบโตของข้าว พบว่า ผลกระทบทางลบของแคดเมียมที่มีต่อความสูงและการแตกกอของข้าวพันธุ์ กข. 7 เห็นได้ชัดเจนที่ระดับของแคดเมียม 1,000 พีพีเอ็ม ส่วนแคดเมียมอัตรา 1-100 พีพีเอ็ม ไม่ทำให้ความสูงและการแตกกอแตกต่างกันในทางสถิติ และผลต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งนั้นมีแนวโน้มให้เห็นที่ระดับแคดเมียม 10 พีพีเอ็ม แต่จะเด่นชัดยิ่งขึ้นในระดับแคดเมียม 1,000 พีพีเอ็ม

อรรธรณ (2522) ได้ศึกษาอิทธิพลของแคดเมียมที่มีต่อองค์ประกอบทางเคมีของพืชอาหารสัตว์ พบว่า เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในดินก็จะเป็นการเพิ่มปริมาณแคดเมียมในพืชที่ปลูกตามไปด้วย ซึ่งมีผลให้การเจริญเติบโตของหญ้าขนลดลง ทั้งในส่วนลำต้นและรากตามลำดับความเข้มข้น และพบว่าหญ้าขนสามารถทนต่อความเป็นพิษของแคดเมียมโดยไม่กระทบต่อการเจริญเติบโตได้ถึง 100 พีพีเอ็ม

4. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปรอท

4.1 ลักษณะและสมบัติ

ปรอทเป็นธาตุที่จัดอยู่ในหมู่ 2B ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 80 เลขมวล 200.59 (Hawley, 1977) มีจุดหลอมเหลว -38.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด 356.6 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะ 13.59 ที่ 20 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 13.596 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 0 องศาเซลเซียส มีความดันไอ 1.85×10^{-3} torr ที่ 40 องศาเซลเซียส 270×10^{-3} torr ที่ 100 องศาเซลเซียส สามารถละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย ความสามารถในการละลายน้ำเท่ากับ 6.4×10^{-5} กรัมต่อลิตร ที่ 25 องศาเซลเซียส (Berman, 1980) ปรอทเป็นโลหะสีขาวเงิน มีคุณสมบัติเป็นของเหลวที่อุณหภูมิและ

ความดันปกติ สามารถทำให้เป็นของแข็งได้ แต่เปราะ และสามารถระเหยเป็นไอได้ พรอทสามารถเปลี่ยนรูปของมันได้มาก ตั้งแต่สูตรโมเลกุลง่ายๆ เช่น สารประกอบซัลไฟด์ จนถึงสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (กองอาชีวอนามัย, 2521) อย่างไรก็ตามพรอทขาดสมบัติที่ดีของโลหะทั่วไป เช่น มีความต้านทานไฟฟ้าสูง และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันทั่วไป (พิมล และ ชัยวัฒน์, 2525) นอกจากนี้ยังสามารถละลายเป็นอมัลกัมกับโลหะหลายชนิด ได้แก่ สังกะสี ตะกั่ว และทองคำ ยกเว้นเหล็กเท่านั้น (Berman, 1980)

กรมควบคุมมลพิษ (2541) กล่าวว่าสารพรอทสามารถอยู่ได้ทั้งในสถานะของแข็งและของเหลวเมื่ออยู่ในสภาพอากาศปกติ วัฏจักรของพรอทในธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องตลอดเวลา ในสถานะอุณหภูมิปกติพรอทบริสุทธิ์จะมีสถานะเป็นของเหลวมีสีขาวคล้ายเงิน จึงเรียกว่า “Liquid Silver” หรือ “Quick Silver” พรอทเป็นโลหะชนิดเดียวที่เป็นของเหลวเมื่ออยู่ในอุณหภูมิปกติและสามารถเป็นของแข็งได้ แต่จะมีความเปราะและระเหยเป็นไอได้

4.2 แหล่งกำเนิด

ในธรรมชาติที่เปลือกโลก (crust) มีพรอทโดยเฉลี่ยประมาณ 0.04 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Wedepohl, 1956) U.S. Geological Survey [USGS] (1970) รายงานว่า พรอทสามารถพบได้ทั้งในหินอัคนี หินตะกอน และหินแปร พรอทเป็นส่วนประกอบของหินต่างๆ ของเปลือกโลก ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 10-20,000 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของหิน เช่น หินอัคนี จะมีพรอทน้อยกว่า 200 ไมโครกรัม/กิโลกรัม และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 100 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ส่วนในหินตะกอนมีพรอทน้อยกว่า 100 ไมโครกรัม/กิโลกรัม และมีบางแห่งที่อาจพบพรอทจากหินตะกอนมากกว่า 200 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ส่วนหินเชลซึ่งเป็นหินที่มีสารอินทรีย์สูงอาจมีพรอทมากถึง 10,000 ไมโครกรัม/กิโลกรัม หรือมากกว่า โดยปกติพรอทเป็นโลหะที่พบในธรรมชาติในสารประกอบของแร่ซินนาบาร์ (cinnabar, HgS) ซึ่งมีสีแดงและไม่ละลายน้ำ และยังพบพรอทในแร่อื่นๆ อีก เช่น Calomel (Hg_2Cl_2), Coloradoite (HgTe), Livingstonite (HgSb_4O_7) และ Tiemannite (HgSe) และยังพบสารประกอบของพรอทในถ่านหินอีกด้วย (พิมล และ ชัยวัฒน์, 2525) นอกจากนี้แล้วพรอทยังปะปนอยู่กับซัลไฟด์ของสินแร่อื่นๆ เช่น สังกะสี ตะกั่ว เหล็ก (Winteringham, 1972) เมื่อหินและแร่สลายตัวแล้วเกิดเป็นดิน โอกาสที่พรอทจะปะปนมากับดินย่อมมีมากด้วย อย่างไรก็ตามการปนเปื้อนของพรอทในสิ่งแวดล้อมมักเกิดขึ้นจากการกระทำของมนุษย์ โดยการปนเปื้อนอันเกิดจากการกระทำของธรรมชาติจะเกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อของแผ่นเปลือกโลกเมื่อมีการเคลื่อนที่ของ

เปลือกโลกและการระเบิดของภูเขาไฟได้นำสิ่งเหล่านี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยปรอทออกมาสู่ด้านบนของแผ่นเปลือกโลก (มนัสวงษ์, 2546)

นอกจากนี้ปรอทอาจมาคือน้ำฝนหรือหิมะได้อีกทางหนึ่ง กล่าวคือ ปรอทอาจถูกพัดพาสู่บรรยากาศด้วยกระบวนการผลิตหรือกระบวนการทางเคมีต่างๆ โดย United Nations Environment Programme [UNEP] (1980) ได้รายงานไว้ใน The State of the World Environment 1980 ว่า พบปรอทในบรรยากาศปกติมักจะต่ำกว่า 0.05 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร และเฉลี่ยแล้วมี 0.02 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร จึงอาจกล่าวได้ว่าน้ำฝนที่ตกลงสู่พื้นผิวโลกจะต้องมีปรอทผสมอยู่เสมอ ถ้าบริเวณใดที่มีการปล่อยควันไฟที่มีปรอทสูงแล้ว ก็อาจทำให้มีปรอทในน้ำฝนสูงด้วย ซึ่งมีผลให้เกิดการสะสมปรอทในดินได้ทุกกรณี

4.3 การนำมาใช้ประโยชน์

เนื่องจากปรอทสามารถเปลี่ยนรูปได้ง่าย จึงมีการนำปรอทมาใช้กันอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในการทำเครื่องมือวิทยาศาสตร์ ได้แก่ บารอมิเตอร์ เทอร์โมมิเตอร์ ใช้ทำเครื่องมือวัดความดันโลหิต ใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้า ได้แก่ สวิตช์อัตโนมัติ หลอดไฟ แบตเตอรี่ วิทยุ ฯลฯ ใช้ทำวัตถุระเบิด ตะเกียงไฮปรอท ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเพื่อป้องกันไม่ให้ยุ่ยง่าย อุตสาหกรรมสีพลาสติก ทำโลหะผสม ใช้เป็นสารกำจัดศัตรูพืชและเชื้อราทางการเกษตร (พิมล และ ชัยวัฒน์, 2525; ศุภมาส, 2545; กุลยา, 2534; กองอาชีวอนามัย, 2521) ประมาณกันว่าอุตสาหกรรมเกษตรใช้ปรอทร้อยละ 10 ของปรอทที่ใช้ทั้งหมด (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

4.4 การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม

ปรอทสามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้จากการสูดดมของหินและแร่ การระเบิดของภูเขาไฟ การไหลบ่าของน้ำ การชะล้างของฝน ปรอทที่ปนเปื้อนที่เกิดจากธรรมชาติมีน้อยมาก ถ้าเปรียบเทียบกับกรกระทำของมนุษย์ที่ทำให้ปรอทปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การทำเหมืองแร่ การเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง ถ่านหิน อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมไฟฟ้า และโลหะผสม (Benett, 1982) ปรอทที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมมี 2 รูปคือ ปรอทอินทรีย์และปรอทอนินทรีย์ โดยปรอทอินทรีย์ไม่มีในธรรมชาติ แต่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนสารปรอทอนินทรีย์ไปเป็นปรอทอินทรีย์ (พิมล และ ชัยวัฒน์, 2525) เมื่อสารปรอทได้ถูก

ปลดปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมของน้ำแล้ว บางส่วนจะเข้าไปติดอยู่กับอินทรีย์วัตถุที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยสิ่งแขวนลอยในน้ำจะทำหน้าที่คล้ายๆ กับตัวกำจัดปรอทออกไปจากน้ำ โดยที่มันจะเหนี่ยวนำให้ปรอทไอออนมาเกาะติดแล้วก็จะเกิดการตกตะกอนลงสู่พื้นของแหล่งน้ำในเวลาต่อมา ปรอทในแหล่งน้ำจึงมีโอกาสะสมในห่วงโซ่อาหารได้ (Hanmerz, 1969) จากการสำรวจปริมาณปรอทที่สะสมในปลาน้ำจืด โดย พิมล และ วิโรจน์ (2520) จากแหล่งน้ำบริเวณใกล้โรงงานบางปะอิน อุตสาหกรรมพบว่ามีปรอทเจือปนในปริมาณสูงมาก คือ 0.71-1.65 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งสูงเกินค่าที่ยอมรับได้ในปลาน้ำจืดขององค์การอาหารและยา แห่งสหรัฐอเมริกา คือ 0.50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

ปรอทอนินทรีย์ที่อยู่ในตะกอนของพื้นก้นแหล่งน้ำมีโอกาสเปลี่ยนเป็นปรอทอินทรีย์ในรูปของ methyl mercury (CH_3Hg^+) ปรอทรูปนี้สามารถละลายน้ำได้ดีมาก จึงมีโอกาสเข้าสะสมในร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่พื้นก้นแหล่งน้ำเป็นแบบไม่มีอากาศ (anaerobic) ปรอทที่ไม่สามารถถูกเปลี่ยนให้เป็นปรอทอินทรีย์ได้ (Jernelov, 1969) ซึ่งการเปลี่ยนรูปของปรอทอนินทรีย์ไปเป็นปรอทอินทรีย์นั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ปริมาณสารอินทรีย์ในดินตะกอน ชนิดและปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ในดินตะกอน (Matsumura *et al.*, 1972)

ความเป็นกรด-ด่างจะมีผลต่อปริมาณของ methyl mercury โดยที่พีเอชต่ำๆ ปรอทในดินตะกอนจะอยู่ในรูป methyl mercury และสามารถเปลี่ยนเป็น monoethyl mercury แต่ถ้าพีเอชสูง สารอินทรีย์ของปรอทไม่สามารถเคลื่อนย้ายจากน้ำเข้าไปสู่สิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำได้ (Environment Protection Agency [EPA], 1979)

ปริมาณปรอทในดินบนควรมีค่าไม่เกิน 400 พีพีบี ค่าที่ถือเป็นค่าปกติอยู่ระหว่าง 50-300 พีพีบี ค่าที่สูงเกินนี้ถือได้ว่าการปนเปื้อนเกิดขึ้น จากการรวบรวมข้อมูลปรอทในประเทศต่างๆ ของ สุภมาส (2545) ปรากฏว่าปริมาณปรอทในดินโดยทั่วไปมีค่าเฉลี่ย 0.05-0.41 พีพีบี โดยในดินฮิสโตซอลล์มีค่าเฉลี่ยสูง แสดงไว้ในตารางที่ 3

4.5 การกระจายของปรอทในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของพืช

พืชแต่ละชนิดที่เจริญเติบโตในดินที่มีสารปรอทมีความสามารถในการดูดและความทนทานสารปรอทต่างกัน โดยปกติปริมาณปรอทในพืชสูงเมื่อพืชนั้นเจริญเติบโตในดินที่มีปริมาณปรอทสูง และรากพืชเป็นส่วนที่มีการสะสมปรอทมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่ามีการสะสมปรอทในใบและเมล็ดมากเช่นกัน (Pendias and Pendias, 1992) จากการศึกษาปริมาณปรอทในพืชน้ำบริเวณใกล้เคียงบริษัท ไทยอะซะฮี (Thai Asahi Caustic Soda Co. Ltd.) โดย Suckcharoen (1980) สามารถตรวจพบปรอทสะสมในต้นพืชและใบ 0.75-1.30 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และส่วนของพืชที่ลอยอยู่เหนือน้ำมีตรวจพบปริมาณปรอท 0.28-0.68 มิลลิกรัม/กิโลกรัม จากปริมาณที่ควบคุมคือ 0.01-0.17 และ 0.01-0.06 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

ปริมาณปรอทในพืชทั่วไปมีปริมาณต่ำ โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 1-10 พีพีบี แต่จะมีค่าสูงในพืชบางชนิด เมื่อปลูกพืชในดินมีการปนเปื้อนปรอท ปรอทสามารถสะสมในพืชเพิ่มขึ้นได้หลายร้อยเท่า โดยพืชที่มีการสะสมปรอทมากที่สุด คือเห็ดที่มนุษย์ใช้บริโภคซึ่งอาจสะสมในส่วนที่มนุษย์ใช้บริโภคในปริมาณสูงถึง 33-200 พีพีเอ็ม (ศุภมาส, 2545) แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ปริมาณปรอทในดินบนชนิดต่างๆ (พีพีเอ็ม)

ชนิดดิน	ค่าเฉลี่ย	พิสัย	ประเทศ
พอดซอลส์ และดินเนื้อหยาบ	0.08	0.01-0.54	อเมริกา
	0.05	0.01-0.70	แคนาดา, ฮอลแลนด์
ฮิสโตซอลส์ และดินอินทรีย์อื่น	0.28	-	อเมริกา
	0.41	0.05-1.11	แคนาดา
ดินนา	0.27	0.13-0.46	ญี่ปุ่น
	0.35	0.15-0.76	ญี่ปุ่น
	0.3	0.02-1.0	เวียดนาม
ดินอื่น	0.28	0.08-0.49	ญี่ปุ่น
	0.08	0.01-0.29	โซเวียต (ฝั่งทวีปเอเชีย)

ที่มา : ศุภมาส (2545)

ตารางที่ 4 ปริมาณปรอทในพืชที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อน (พีพีเอ็ม นน.แห้ง)

แหล่ง	พืช	ส่วนของพืช	พิสัย	ประเทศ
เหมืองและ อุตสาหกรรมโลหะ	เห็ด	ก้านและหมวก	37.6	ยูโกสลาเวีย
Chlor-alkali,	ชา	ลำต้น	1-3.5	อเมริกา
	ผักกาดหอม	ใบ	0.15-0.36	สวีตเซอร์แลนด์
โรงงานเคมี	ข้าวโพด	เมล็ด	0.074-0.136	สวีตเซอร์แลนด์
	เห็ด	ก้านและหมวก	72-200	ฟินแลนด์
สวนในบ้าน,	เห็ด	ก้านและหมวก	33.6	สวีตเซอร์แลนด์
สวนสาธารณะ				
กากตะกอน,	หญ้าชูดาน	ใบ	0.04-0.06	ฮังการี
พื้นที่ชลประทาน	ข้าวโพด	เมล็ดไม่ขัดสี	4.9	ญี่ปุ่น
สารฆ่ารา, เกลือปรอท	มันฝรั่ง	ใบ	1.1-6.8	แคนาดา
	ผักกาดหอม	ใบ	0.1-0.3	แคนาดา

ที่มา : ศุภมาส (2545)

4.5 ปฏิกริยาในดิน

เมื่อใส่ปรอทลงในดิน ไม่ว่าจะใส่ในรูปธาตุปรอท สารประกอบเชิงซ้อนที่อยู่ในรูป แคตไอออน หรือแอนไอออนก็ตาม ดินก็จะดูดซับปรอทเอาไว้ ปรอทในดินสามารถเปลี่ยนรูปได้ทั้ง โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน รีดักชัน ไฮเดรชันหรือเกิดสารอินทรีย์ ปรอทในดินถูกตรึงไว้ในรูปต่างๆ ด้วยปัจจัยที่ต่างกัน แร่ดินเหนียวดูดซับปรอทไว้ได้ไม่มาก แต่ในดินน้ำขังสภาพกรด ปรอทอาจเกิดเป็น HgS หรือแม้กระทั่งเกิดโลหะปรอทได้ โดยที่การตรึงปรอทในสภาพกรดจะมีค่าสูงสุดใน สภาพดินพีเอช 4-5 นอกจากนั้นการตรึงปรอทในดินยังขึ้นกับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (หรือ ปริมาณอินทรีย์วัตถุ) และ CEC ของดิน ดินที่มีอินทรีย์วัตถุมากทำให้เกิดสารประกอบอินทรีย์ เชิงซ้อนของปรอท ดังนั้นสภาพการเคลื่อนที่ได้ของปรอทจึงขึ้นอยู่กับสภาพการสลายตัวทางเคมี หรือชีวภาพของสารประกอบอินทรีย์ดังกล่าว จึงกล่าวได้ว่าดินอินทรีย์จะมีปริมาณปรอทในดินสูงกว่าดินอนินทรีย์ ทั้งนี้เพราะว่าดินอินทรีย์มีอิทธิพลส่วนที่ยังไม่เสถียร เป็นตัวจับปรอทได้มากกว่า สารอินทรีย์ในดินมีส่วนในการเกิดกระบวนการเมทิลเลชัน เพื่อเปลี่ยนปรอทอนินทรีย์ไปเป็นปรอทอินทรีย์ โดยเป็นตัวปลดปล่อยกลุ่มเมทิลซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับปรอท การเกิดออกซิเดชัน รีดักชัน ของปรอทในดินเกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์ในดินธาตุปรอทสามารถถูกออกซิไดส์เปลี่ยนเป็นรูปแคตไอออนได้โดยการกระทำของจุลินทรีย์ โดยที่แบคทีเรียและยีสต์หลายชนิดสามารถรีดิวซ์ปรอทแคตไอออน Hg^{2+} ให้เปลี่ยนเป็นธาตุปรอท Hg^0 ได้เช่นกัน ดังนั้นจุลินทรีย์ทั้งแบคทีเรียและเชื้อราต่างมีศักยภาพที่ทำให้เกิดกระบวนการเมทิลเลชันได้ทั้งในสภาพมีและไม่มีออกซิเจน (สุกมาศ, 2545)

4.6 ความเป็นพิษ

ความเป็นพิษของปรอทแต่ละรูปแบบจะไม่เท่ากัน สารประกอบอนินทรีย์ของปรอท เป็นพิษไม่ร้ายแรงนักเมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบอินทรีย์ของปรอท ปรอทเมธิล (methylmercury) มี half-life ในมนุษย์ประมาณ 72 วัน ขณะที่ปรอทอนินทรีย์มีอายุแค่ 5 วัน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) สารปรอทอนินทรีย์ ที่ละลายน้ำได้ จะมีโอกาสเข้าสู่ร่างกายได้ง่าย โดยปะปนเข้าไปกับอาหารและน้ำดื่ม เช่น Hg_2Cl_2 และ $HgCl_2$ เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะไปกีดขวางเดินอาหารและไตได้ (พิมล และ ชัยวัฒน์, 2525) อาการที่เกิดจากพิษของปรอทมีทั้งอาการเฉียบพลัน และพิษเรื้อรัง อาการที่เป็นพิษเฉียบพลัน เป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจ เซลล์เยื่อเมือกกระคายเคือง ปากคอไทม์มีรสโลหะติดปาก ร่างกายพยายามขับโลหะออกจากร่างกาย ทำให้น้ำเยื่อหลุดออกเป็นชิ้นๆ ชีพจรเต้นเร็ว แต่ไม่สม่ำเสมอ ท้องเสีย อุจจาระเป็นเลือด อาเจียน หมดสติและถึงตาย

(Berman, 1980) สำหรับพิษเรื้อรัง ระยะแรกจะไม่แสดงอาการ ต่อมาจะรู้สึกปวดศีรษะเวียน ตกใจง่าย ตามัว มือสั่น ต่อมาน้ำลายทำงานผิดปกติ น้ำลายไหลตลอดเวลา เหงือกเป็นสีน้ำเงิน กังวาล นอนไม่หลับ มีอาการทางประสาท (Goldwater and Stopford, 1977)

ในปี พ.ศ. 2506 ที่อ่าวมินามาตะทางใต้ของประเทศญี่ปุ่น ได้ตรวจพบว่าชาวประมงแถบนั้นมีอาการผิดปกติ คือสายตามัว เกิดอาการเหน็บชา และบางส่วนเป็นอัมพาต ความจำเสื่อม เสียสติและในที่สุดก็เสียชีวิต จนถึงปี พ.ศ. 2508 พบว่ามีคนเกิดอาการนี้ถึง 40 คน จากการศึกษาพบว่า สาเหตุของโรคนี้เกิดจากสารประกอบพวกปรอทซัลเฟต ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในโรงงานอุตสาหกรรมมีการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ ปรอทซัลเฟตซึ่งเป็นสารอินทรีย์ถูกเปลี่ยนเป็นปรอทเมทิลซึ่งเป็นสารอินทรีย์สะสมอยู่ในเซลล์ของพืชน้ำ และเกิดการถ่ายทอดมายังสัตว์น้ำจนถึงคน และเนื่องจากสารปรอทอินทรีย์ละลายได้ดีมากในไขมัน ดังนั้นเมื่อสารปรอทเข้าสู่ร่างกายจึงไปสะสมตามเนื้อเยื่อของร่างกายที่มีความเข้มข้นของไขมันสูงๆ เช่น ที่มันสมอง และไปขัดขวางการทำงานของระบบประสาท ทำให้ระบบประสาทผิดปกติ จึงเรียกโรคนี้ว่า โรคมินามาตะ (กุลยา, 2534 ; ประชา, 2534 ; สมใจ, 2534 ; พิมล และ ชัยวัฒน์, 2525)

5. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารหนู

5.1 ลักษณะและสมบัติ

สารหนูหรืออาร์เซนิก เป็นธาตุที่อยู่อยู่ในหมู่ 5A ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 33 เลขมวล 74.92 มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 2, 3 และ 5 ไม่พบสารหนูในรูปของไอโซโทปในธรรมชาติ ระบุเป็นไอที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และระเหยได้เร็วมากที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส สามารถระเหิดได้ที่อุณหภูมิ 615 องศาเซลเซียส ที่ บรรยากาศ 760 มิลลิเมตรของปรอท โดยไม่มีการหลอมเหลวก่อน ไม่ละลายน้ำ ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดกำมะถันที่เย็นหรือกรดเกลือที่เย็น เมื่อถูกกรดไนตริกที่เย็นหรือกรดกำมะถันที่ร้อนจะทำปฏิกิริยาและเปลี่ยนรูปไปเป็นกรดอาเซนัสหรืออาเซนิก สารหนูมีลักษณะเป็นผลึกโลหะมันเงา สีเงินเทาเปราะหักง่าย เมื่อถูกความร้อนในอากาศสามารถเปลี่ยนเป็นสีดำ และรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศเป็นอาร์เซนิกไดรอกไซด์ (As_2O_3) ไอของสารหนูเมื่อเย็นตัวทันทีทันใดจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง แต่จะไม่มีคุณสมบัติทางโลหะอีกต่อไป สารหนูสีเหลืองนี้จะเปลี่ยนสีกลับไปเป็นสีเงินเทาหรือสีดำได้ถ้าได้รับแสงอุลตราไวโอเลตในระยะเวลาสั้นๆ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

5.2 แหล่งกำเนิด

ในธรรมชาติสารหนูเกิดขึ้นจากการสีกกร่อนของพื้นผิวโลกหรือเปลือกโลก หรือจากก๊าซของภูเขาไฟ สารหนูที่พบในธรรมชาตินั้นมักพบเจือปนอยู่ในรูปของสารประกอบอาร์เซไนต์ หรือซัลไฟด์ของทองแดง ตะกั่ว เงิน และทอง มักไม่ค่อยพบในรูปของโลหะ ส่วนใหญ่จะพบในรูปของแร่อาร์ซีนโนไฟไรต์ (FeAsS) รีอัลการ์ (As_4S_4) และออร์พิเมน (As_2S_3) ปริมาณสารหนูบนพื้นผิวโลกมีประมาณ 1.5-2.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งนับว่ามากเป็นอันดับที่ 20 เมื่อเทียบกับธาตุอื่นๆ ในดินทั่วๆ ไปจะมีสารหนูประมาณ 0.2-40 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และยังพบสารหนูในรูปออกซิไดส์ในตะกอนท้องน้ำ นอกจากนี้สารหนูยังได้จากการเผาไหม้ เช่น การหลอมโลหะ การเผาถ่านหิน เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

5.3 การนำมาใช้ประโยชน์

สารหนูที่ใช้ภายในประเทศได้จากการนำเข้าจากต่างประเทศ ได้แก่ ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน เวียดนาม ฝรั่งเศส อิตาลี โปแลนด์ อังกฤษ สหรัฐอเมริกา โดยนำเข้าในรูปสารประกอบอาร์ซีนิกไดรอกไซด์, อาร์ซีนิกเพนทอกไซด์และโซเดียมอาร์ซีนไนด์ สารประกอบสารหนูส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ทางด้านเกษตรกรรม นอกจากนั้นยังใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว และเซรามิก และใช้เติมในอาหารสัตว์ จากการรายงานของสหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ. 1975-1978 พบว่า อาร์ซีนิกไดรอกไซด์ที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตสารเคมีทางการเกษตร 82 เปอร์เซ็นต์ อุตสาหกรรมแก้ว 8 เปอร์เซ็นต์ อุตสาหกรรมเคมีโลหะผสมทองแดงและตะกั่ว และอุตสาหกรรมยา ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ (กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2530)

ทางการเกษตรสารหนูพบได้ทั่วไปในยาฆ่าแมลงและยาปราบศัตรูพืช ในรูปของสารประกอบ เช่น lead arsenate, calcium arsenate, copper acetoarsenate, copper arsenite และ disodium methyl arsenate พืชผัก ผลไม้ ใบยาสูบ จึงอาจมีสารหนูเป็นสารพิษตกค้างอยู่

ทางด้านอุตสาหกรรม ใช้ผสมกับโลหะอื่นๆ เพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อน สารหนูที่ใช้คือ metallic arsenic ใช้เป็นวัสดุกึ่งตัวนำในเครื่องมือทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์, โซลาร์แบตเตอรี่ ใช้เป็นสารให้สีแดงหรือไม่มีสีในผลิตภัณฑ์แก้ว และทำให้แก้วหลอมละลาย (ไมตรี, 2531)

5.4 การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม

กิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ถือได้ว่าเป็นปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดการแพร่กระจายของสารหนูสู่สิ่งแวดล้อม มีผลให้เกิดการปนเปื้อนของสารหนูในบรรยากาศ ดิน น้ำ และสิ่งมีชีวิตต่างๆ เช่น การเผาถ่านหินที่สหรัฐอเมริกาพบสารหนูในปริมาณ 1-10 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในขณะที่ประเทศเชกโกโลวาเกียพบสารหนูในปริมาณที่สูงถึง 1,500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม หลังจากการเผาไหม้ถ่านหินจะได้ฝุ่นอาร์ซีนีออกไซด์เจือปนในบรรยากาศ ซึ่งจะปนเปื้อนสู่ดินและแหล่งน้ำในรูปของอาร์ซีนีและอาร์ซีนีต และสารหนูที่อยู่ในดินสามารถปนเปื้อนและแพร่กระจายสู่น้ำใต้ดินและแหล่งน้ำใกล้เคียงได้ บริเวณที่พบปริมาณสารหนูทางธรณีวิทยาโดยเฉพาะสินแร่ซัลไฟด์และดินจากภูเขาไฟนั้นจะพบว่าพืชและแหล่งน้ำใกล้เคียงมีความเข้มข้นของสารหนูในปริมาณที่สูงแปรตามสภาพธรรมชาติที่พบ กล่าวคือ ถ้าปริมาณสารหนูในน้ำเพิ่มขึ้น 0.03-0.07 มิลลิกรัม/ลิตร จะพบความเข้มข้นของสารหนูในพืชน้ำเพิ่มสูงขึ้นถึง 971 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

อนุภาคสารหนูในบรรยากาศมีทั้งในรูปสารประกอบอนินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในบรรยากาศบริเวณที่ไม่มีการปนเปื้อนมีค่าต่ำมากคือน้อยกว่า 1-2 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร ส่วนบริเวณที่ใกล้เคียงกับแหล่งถลุงแร่ทองแดง ตะกั่ว ปริมาณสารหนูในบรรยากาศที่ตรวจวัดได้มีมากกว่า 1 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

สารหนูในน้ำมีทั้งในรูปสารประกอบอนินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ ในรูปสารประกอบอนินทรีย์ ได้แก่ arsenite และ arsenate ส่วนในรูปของสารประกอบอินทรีย์พบได้น้อยกว่า สารประกอบอินทรีย์ ที่สำคัญได้แก่ methylarsenic acid และ dimethylarsenic acid ปริมาณสารหนูในแหล่งน้ำผิวดินโดยทั่วไปมีปริมาณต่ำ จากการรายงานการสำรวจคุณภาพน้ำแม่น้ำท่าจีน ปี 2525 ของสำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พบว่าปริมาณสารหนูในแม่น้ำท่าจีนมีค่าเฉลี่ยตลอดปี อยู่ในช่วง 1.2-6.8 ไมโครกรัม/ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

สารหนูมีปริมาณต่ำสุดในดินทราย และมีปริมาณสูงในกลุ่มดินตะกอนน้ำพา (alluvial soil) ปริมาณที่พบมีตั้งแต่ น้อยกว่า 0.1 พีพีเอ็ม ถึง 30 พีพีเอ็ม เช่น ในประเทศไทย มีปริมาณ 2.4 พีพีเอ็ม โดยเฉลี่ยในดินเนื้อหยาบ และ 12.8 พีพีเอ็ม ในดินเนื้อละเอียด (ศุภมาส, 2545) แสดงไว้ในตารางที่ 5

5.5 การกระจายของสารหนูในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของพืช

ปริมาณสารหนูในพืชที่ปลูกในพื้นที่ที่ไม่เคยใช้สารพิษป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ พบว่ามีปริมาณสารหนูแตกต่างกันไปตั้งแต่ 0.1-5.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) ส่วนพืชที่ปลูกในพื้นที่ที่ได้รับการปนเปื้อนด้วยสารหนู พบว่ามีปริมาณสารหนูในพืชสูงโดยเฉพาะในราก (ศุภมาส, 2545)

5.6 ปฏิกิริยาในดิน

แร่ของสารหนูส่วนใหญ่อยู่ในรูปอาร์ซีเนต และสารประกอบของสารหนูส่วนใหญ่ละลายได้ง่าย แต่การเคลื่อนที่ในดินค่อนข้างจำกัด เนื่องจากถูกตรึงโดยแร่ดินเหนียว ไฮดรอกไซด์ และอินทรีย์วัตถุในดิน

สารหนูในรูปแอนไอออนหลายรูป เช่น AsO_2^- , AsO_4^{3-} , HAsO_4^{2-} และ H_2AsO_4^- สารเหล่านี้ถูกตรึงในดินในช่วงพีเอช 7-9 โดยที่อาร์ซีเนต AsO_4^{3-} มีนิสสัยคล้ายกับฟอสเฟต ซึ่งอาจถูกตรึงได้โดยแร่ดินเหนียว ฮิวมัส แคลเซียม และออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม

สารหนูที่ถูกตรึงแล้วจะถูกปลดปล่อยได้ยาก ในดินสภาพกรดจะพบสารหนูในรูปอาร์ซีเนตของเหล็กและอะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ ปัจจัยที่ควบคุมการตรึงสารหนูได้แก่ ปริมาณออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม ศักย์รีดอกซ์ และพีเอชของดิน (ศุภมาส, 2545)

5.7 ความเป็นพิษ

สารหนูเป็นเกลืออนินทรีย์มีพิษร้ายแรงกว่าธาตุสารหนูบริสุทธิ์ ซึ่งแตกตัวเป็นไอออนไม่ได้ แต่สารหนูอินทรีย์บางตัวอาจถูกออกซิไดส์ให้กลายเป็นเกลืออนินทรีย์ได้เมื่อเข้าสู่ร่างกาย ฉะนั้นการใช้ยาที่มีอาร์ซีนิกเป็นส่วนประกอบอาจมีพิษแทรกซ้อนได้ง่าย สารประกอบอีกอย่างหนึ่งของอาร์ซีนิกที่เป็นพิษร้ายแรงมากและระเหยได้ง่าย คือ อาร์ซีน (arsine) ซึ่งมีสูตรทางเคมีเป็น AsH_3 เป็นก๊าซไม่มีสี แต่มีกลิ่นฉุนคล้ายกลิ่นกระเทียม ดัดไฟง่าย หากถูกความร้อนจะกลายเป็น As ความเข้มข้นของ AsH_3 เพียง 30 ส่วนในล้านส่วนในอากาศจะทำให้เกิดอาการพิษของสารหนูในคนได้ (ไมตรี, 2531)

สารประกอบอาร์ซีนิกสามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยผ่านทางเดินอาหาร ปอด ผิวหนังได้ง่ายและรวดเร็ว อวัยวะเป้าหมายที่สารหนูจะเข้าไปสะสม คือ ตับ ไต ผนังทางเดินอาหาร เส้นผม ขน เล็บ และสมอง ผู้ที่ได้รับสารหนูเข้าไปจะปรากฏมีรอยพาดสีชาบนเล็บมือเล็บเท้า แสดงถึงการหยุดชะงักของการเจริญเติบโตของเล็บ ภายใน 2-8 ชั่วโมงหลังจากที่ได้รับสารหนูเข้าไปสารหนูจะถูกขับออกทางปัสสาวะเป็นส่วนใหญ่ แต่ถ้ามีการสะสมไว้นานและมีปริมาณมากอาจต้องใช้ระยะเวลาจนถึง 70 วัน สารหนูจึงจะหมดไปจากกระแสเลือด สารประกอบอาร์ซีนิกที่เป็น As^{3+} รวมกับ หมู่ซัลไฮดริล (-SH) ของโปรตีนและเอนไซม์ รวมทั้ง glutathione, cysteine ในเซลล์ได้ จึงทำให้ระบบออกซิเดชัน-รีดักชัน และเมตาบอลิซึมของเซลล์ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ อาการความเจ็บป่วยจึงเกิดขึ้นได้ และก๊าซอาร์ซีนิกก็เป็นพิษในลักษณะเดียวกัน นอกจากนี้ AsH_3 ยังรวมตัวกับฮีโมโกลบินแล้วถูกออกซิไดส์กลายเป็นสารพิษต่อเม็ดเลือดแดง ทำให้เกิดการสลายตัวของเม็ดเลือดแดง (haemolysis) เกิดการทำลายเซลล์ของตับ ม้ามและไต อาการที่สังเกตเห็นได้ คือ ปัสสาวะมีสีแดง ต่อมามีอาการดิซ่านและโลหิตจาง ปวดหัว อาเจียน หนาวสั่น มีไข้ ปัสสาวะไม่ออก ปวดเอว และเสียชีวิตในที่สุด (ไมตรี, 2531)

ระดับความเป็นพิษของสารหนูในดินต่อพืชต่างๆ มีค่าไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารหนู ชนิดของพืช และประเภทของเนื้อดิน ถวิล (2526) ได้รายงานว่า สารหนูในรูปโซเดียมอาร์ซีเนต ในปริมาณ 100 พีพีเอ็ม ในดินมาบบอนซึ่งเป็นดินร่วนปนทราย ทำให้ต้นกล้าจากท่อนมันสำปะหลังหยุดชะงักการเจริญเติบโตทั้งส่วนยอดและส่วนราก โดยเฉพาะรากไม่งอกจากท่อนพันธุ์เลย (สุภมาศ, 2545)

ตารางที่ 5 ปริมาณสารหนูในดินบนชนิดต่างๆ (พีพีเอ็ม)

ชนิดดิน	ค่าเฉลี่ย	พิสัย	ประเทศ
พอดซอลส์ และดินเนื้อหยาบ	5.1	0.1-30	อเมริกา
	4	1.2-6.8	ญี่ปุ่น, เกาหลี
	2.4	n.a.	ไทย
ดินร่วนถึงเหนียว	7.7	1.7-27	อเมริกา
	12.8	7.2-18.4	ไทย

ที่มา : ศุภมาส (2545)

6. ค่ามาตรฐานของโลหะหนักในดิน

เพื่อประเมินว่า ดินมีการปนเปื้อนของโลหะหนักหรือไม่ จำเป็นต้องมี “ค่าพื้นฐาน” เพื่อเป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนัก ค่าดังกล่าวนี้อาจเรียกว่าเป็น “ระดับเกณฑ์พื้นฐาน (background levels)” หรือ “ระดับตรวจสอบ (investigation levels)” ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่นำมาใช้เพื่อประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนักในระยะแรก ระดับเหล่านี้ไม่ได้บ่งชี้ถึงอันตรายที่อาจเกิดขึ้น แต่เป็นระดับความเข้มข้นที่ต้องตรวจสอบต่อไปว่า การปนเปื้อนที่เกิดจากความเข้มข้นระดับนั้นเกี่ยวข้องกับกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์หรือไม่ หรือทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดมลพิษในสภาพแวดล้อมและเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์หรือไม่ ในประเทศที่พัฒนาแล้วหลายๆ ประเทศ มีมติให้กำหนดมาตรฐานความปลอดภัยของโลหะหนัก ที่ยอมรับให้มีได้สูงสุดในดินและวัสดุที่ใช้ในการปรับปรุงดินในการเกษตร โดยกำหนดให้มีปริมาณความเข้มข้นของสังกะสี 300 มก./กก. ตะกั่ว 100 มก./กก. และแคดเมียม 3 มก./กก. (ปรีดา และคณะ, 2541)

พิชิตและสุรสิทธิ์ (2543) ได้ทำการสำรวจและเก็บตัวอย่างดินชั้นบนในพื้นที่ทำการเกษตร และแปลงทดลองในทุกภาคของประเทศไทย โดยเลือกการเก็บตัวอย่างในบริเวณที่มีแนวโน้มว่าการปนเปื้อนสูง มาทำการประเมินและกำหนดระดับเกณฑ์มาตรฐานการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทย โดยอาศัยค่าความเข้มข้นที่ 95th percentile ทำให้สามารถกำหนด “ระดับเกณฑ์พื้นฐาน” ของโลหะในดินได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6 พบว่าค่าของตะกั่ว แคดเมียม โปรทและสารหนู มีเท่ากับ 55, 0.15, และ 0.10 และ 30 มก./กก. ตามลำดับ ซึ่งทำให้ทราบว่าปริมาณแคดเมียมยังคงต่ำมาก ในขณะที่ระดับของสารตะกั่วในดินที่ใช้ทำการเพาะปลูกของประเทศไทยค่อนข้างสูงกว่าธาตุพืชอื่นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่อนุญาตให้พืชมินในดินที่ใช้เพาะปลูกพืชอาหารของกลุ่มสหภาพยุโรป ดังนั้นหากพบว่าตัวอย่างดินในพื้นที่ใดมีความเข้มข้นของธาตุต่างๆ สูงกว่าระดับนี้ เป็นดินที่มีแนวโน้มว่าจะมีการปนเปื้อนของโลหะหนักที่อาจเกิดจากสาเหตุต่างๆ

ศุภมาส (2545) ได้รายงานค่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่ถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ให้มีอยู่ในดิน (ppm) และค่าวิกฤติในพืชที่เริ่มยับยั้งการเจริญเติบโต ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ปริมาณโลหะหนัก (มก./กก.) ในดินที่ใช้เพาะปลูกของประเทศไทย

ธาตุ	พืช	ค่ามัธยฐาน	ระดับเกณฑ์พื้นฐาน
ตะกั่ว	0.10-550	9	55
แคดเมียม	0.01-0.29	0.01	0.15
ปรอท	0.01-0.27	0.03	0.1
สารหนู	0.08-124	2.7	30

ที่มา : ปริดา และคณะ (2547)

ตารางที่ 7 ค่าสูงสุดของโลหะหนักที่ถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ให้มีในดิน (ppm) และค่าวิกฤติในพืชที่เริ่มยับยั้งการเจริญเติบโต

ธาตุ	ปริมาณในดิน (ppm)		ปริมาณในพืช (ppm นน.แห้ง)	
	ไม่เกิดเป็นพิษ ค่าที่รับได้	ค่าที่เริ่มอาการ เป็นพิษในพืช	เกิดอาการใน พืชที่ไวต่อพิษ	ค่าที่ทำให้ผลผลิต ลดลง 10%
ตะกั่ว	n.a.	100-400	n.a.	n.a.
แคดเมียม	n.a.	3-พ.ค.	5-ต.ค.	ต.ค.-20
ปรอท	2	2-พ.ค.	0.5-1	1-ส.ค.
สารหนู	2	15-50	n.a.	ม.ค.-20

ที่มา : ดัดแปลงจาก สุภมาส (2545)

7. ค่ามาตรฐานของโลหะหนักในอาหาร

กระทรวงสาธารณสุข (2529) ได้กำหนดเกณฑ์มาตรฐานของโลหะหนักที่ยอมให้มีได้ในอาหารทั่วไปและอาหารทะเล เพื่อเป็นการประเมินว่าอาหารมีการปนเปื้อนโลหะหนักหรือไม่ โดยกำหนดให้ปริมาณสูงสุดที่ยอมรับให้มีได้ของตะกั่ว แคดเมียม ปรอท และสารหนู ในอาหารทั่วไป มีค่าไม่เกิน 1.0, 0.8, 0.02 และ 2.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ และปริมาณปรอทที่ยอมรับให้มีได้ในอาหารทะเล ต้องมีค่าไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 มาตรฐานของโลหะหนักในอาหาร

โลหะหนักที่ทำการศึกษา	หน่วย	ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีได้
ตะกั่ว	มก./กก.	ไม่เกิน 1.0*
แคดเมียม	มก./กก.	ไม่เกิน 0.8*
ปรอท	มก./กก.	ไม่เกิน 0.02*
		ไม่เกิน 0.05**
สารหนู	มก./กก.	ไม่เกิน 2.0*

หมายเหตุ * อาหารทั่วไป

** อาหารทะเล

ที่มา: ดัดแปลงจากกระทรวงสาธารณสุข (2529)

8. ข้าวโพดหวาน

8.1 ความสำคัญของข้าวโพดหวาน

ข้าวโพด (*Zea mays* L.) เป็นธัญพืชที่ใช้เป็นอาหารของมนุษย์ ซึ่งจัดเป็นพืชที่มีความสำคัญเป็นอันดับ 3 ของโลก มีการผลิตทั่วไปในเขตอบอุ่น (temperate) เขตอากาศกึ่งร้อนชื้น (subtropic) และพื้นที่ราบเขตร้อน (lowland tropic) เมล็ดของข้าวโพดมีแบ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ใช้เป็นอาหารหลักของมนุษย์ในหลายๆประเทศ ส่วนประกอบของเมล็ดข้าวโพดสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมแป้ง น้ำมัน น้ำตาล และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้อีกหลายชนิด รวมทั้งส่วนต้นของข้าวโพดยังสามารถนำมาใช้เป็นพืชอาหารสัตว์ ได้แก่ เป็นหญ้าสด หญ้าแห้ง และหญ้าหมัก ข้าวโพด ได้อีกด้วย (ราเชนทร์, 2539)

8.2 สถานการณ์ปัจจุบันและอนาคต

ข้าวโพดหวานจัดอยู่ในกลุ่มพืชเพื่อการส่งออก เป็นพืชที่มีศักยภาพสูง เพราะปลูกง่าย ใช้ระยะเวลาการผลิตสั้น มีความเสี่ยงต่ำ การส่งออกข้าวโพดหวานมีหลายรูปแบบ เช่น การแปรรูปบรรจุกระป๋อง แบบบรรจุทั้งเมล็ดฝัก ข้าวโพดครีม นอกจากนี้ยังมีการนำต้น ใบ เปลือก และฝักเสียของข้าวโพดหวานไปใช้ในอุตสาหกรรมเลี้ยงโคนมกันอย่างแพร่หลาย ในปี 2545 มีการส่งออกข้าวโพดหวานในรูปแบบต่างๆ เป็นมูลค่า 1,634 ล้านบาท และปี 2546 มูลค่าการส่งออกเพิ่มขึ้นเป็น 2,122 ล้านบาท นอกจากนี้ ในปี 2545 โรงงานแปรรูปทั้งหมดในประเทศต้องการผลผลิตข้าวโพดหวานประมาณ 1,200 ตัน/วัน และคาดว่าปริมาณความต้องการจะเพิ่มขึ้นเป็น 1,700 ตัน/วัน

ประเทศไทยส่งออกข้าวโพดหวานสูงเป็นอันดับ 4 ของโลก ในช่วงปีการเพาะปลูก 2543-2546 มีพื้นที่เพาะปลูกระหว่าง 157,539-210,271 ไร่ ผลผลิตรวมมีค่าระหว่าง 253,394-355,978 ตัน และผลผลิตเฉลี่ยมีค่าระหว่าง 1,668-1,727 กก./ไร่ ในปี 2545/2546 พื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่อยู่ในภาคตะวันตก (33%) ตามด้วยภาคเหนือ (24%) ภาคอีสาน (19%) ภาคกลาง (11%) และภาคใต้ (10%) ผลผลิตโดยเฉลี่ยทั่วไปจะไม่แตกต่างกันมากนักในแต่ละปี การส่งออกข้าวโพดหวานในช่วงปี 2544-2546 โดยทั่วไปมีปริมาณและมูลค่าเพิ่มขึ้น โดยปริมาณการส่งออกรวมในรูปแบบต่างๆ เพิ่มขึ้นจาก 37,053 ตัน ในปี 2544 เป็น 77,432 ตัน ในปี 2546 ในทำนองเดียวกัน มูลค่าการส่งออกเพิ่มจาก 1,028 ล้านบาท เป็น 2,122 ล้านบาท โดยปริมาณการส่งออกและมูลค่า

ข้าวโพดหวานในรูปปรุงแต่งไม่แช่เย็นจนแข็ง มีค่าระหว่าง 35,848-76,118 ตัน และ 980-2,078 ล้านบาท ตามลำดับ การส่งออกในรูปข้าวโพดหวานดิบหรือทำให้สุกแช่แข็ง มีค่าระหว่าง 1,205-1,314 ตัน คิดเป็นมูลค่า 44-48 ล้านบาท (กรมวิชาการเกษตร, 2545)

8.3 ลักษณะประจำพันธุ์ของข้าวโพดหวานพันธุ์ ATS-5

ข้าวโพดหวานพันธุ์ ATS-5 เป็นพันธุ์ลูกผสม มีลักษณะทางการเกษตรที่สม่ำเสมอ ได้แก่ ขนาดฝัก ความยาวของฝัก ความสูงของต้น อายุถึงวันออกไหมและเก็บเกี่ยว ให้ผลผลิตและคุณภาพสูงกว่าพันธุ์ผสมเปิด อายุถึงวันออกไหมของข้าวโพดหวานพันธุ์ ATS-5 ประมาณ 50-52 วัน ผลผลิตฝักสดทั้งเปลือก 2,000-3,000 กก./ไร่ ผลผลิตฝักสดเปลือก 1,400-1,800 กก./ไร่ มีค่าความหวานเท่ากับ 14.5 องศาบริกซ์ เมล็ดมีสีเหลือง เหมาะสำหรับการบริโภคฝักสด และอุตสาหกรรมแปรรูป (กรมวิชาการเกษตร, 2545)

9. ผลของปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมีต่อการดูดกินโลหะหนักของพืช

ปุ๋ยหมัก (composts) คือ ปุ๋ยที่ได้จากการหมักอินทรีย์สารให้สลายตัวผู้พังตามธรรมชาติ โดยนำสิ่งเหล่านี้มากองรวมกัน รดน้ำให้ชื้น แล้วปล่อยให้แห้งเพื่อให้สลายตัวเรื่อย ๆ จนได้ที่ จึงนำไปใช้บำรุงดินในการเตรียมกองปุ๋ยหมัก อาจใส่ปุ๋ยเคมีลงไปบ้างเพื่อช่วยเร่งกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินและเพิ่มคุณค่าด้านธาตุอาหารของปุ๋ยหมักด้วยก็ได้ ปุ๋ยชนิดนี้บางคนเรียกว่า ปุ๋ยคอกเทียม (artificial manure หรือ synthetic manure) (ยงยุทธ, 2528)

ปุ๋ยหมักเป็นอินทรีย์วัตถุชนิดหนึ่งซึ่งอินทรีย์วัตถุสามารถดูดซับประจุบวกได้มาก เป็นการช่วยรักษาประจุบวกไม่ให้สูญหายไปจากดินโดยการชะล้าง และยังทำหน้าที่เป็น buffer (ตัวต้านทานการเปลี่ยนแปลงกะทันหัน) เช่น การเพิ่มความเป็นกรดหรือด่าง ความเค็ม ยากำจัดศัตรูพืช ธาตุโลหะหนักอินทรีย์วัตถุจะดูดซับไว้ เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาอย่างกะทันหัน ซึ่งถ้าเกิดขึ้นจะเป็นพิษต่อพืชที่ปลูก (วรพจน์, 2530)

สุภาพร (2545) กล่าวว่าเมื่อนำมูลฝอยที่ปนเปื้อนด้วยสารอันตรายและโลหะต่างๆ มาเข้าสู่กระบวนการผลิตเป็นปุ๋ยหมัก และนำปุ๋ยหมักดังกล่าวไปใช้ในการเกษตรก็จะส่งผลให้เกิดการสะสมของโลหะหนักในดิน ในที่สุดก็จะสะสมอยู่ในพืชและเกิดการถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหาร

และส่งผลต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ในขณะที่ ทวีสิทธิ์ (2536) ศึกษาปริมาณตะกั่ว โปรท แคดเมียม และสารหนูในปุ๋ยหมักไฮเทคจากขยะของเขตเทศบาลเมืองเพชรบุรี พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักส่วนใหญ่มาจากการใช้ในทางการเกษตรอยู่ในอินทรีย์วัตถุองค์ประกอบของขยะ เมื่อมีการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ทำให้อินทรีย์วัตถุในขยะเปื่อยยุ่ย เกิดการสูญเสียอินทรีย์คาร์บอน ของแฉะ ระบาย ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของตะกั่ว โปรท แคดเมียม และสารหนูที่ปนเปื้อนอยู่ในองค์ประกอบขยะ จึงมากขึ้นตามอัตราการย่อยสลาย

ปุ๋ยเคมี คือ ปุ๋ยที่ได้จากสารอนินทรีย์หรืออินทรีย์สังเคราะห์รวมถึงปุ๋ยเชิงเดี่ยว ปุ๋ยเชิงผสม และปุ๋ยเชิงประกอบ และหมายความตลอดถึงปุ๋ยอินทรีย์ที่มีปุ๋ยเคมีผสมอยู่ด้วย แต่ไม่รวมถึงปุ๋ยขาว ดินมาร์ล ปุ๋ยพลาสติก หรืออิปซัม (ยงยุทธ, 2528)

ในปุ๋ยเคมีอาจมีการปนเปื้อนของโลหะหนักมาจากระบวนการผลิต ทำให้ดินได้รับการปนเปื้อนโลหะหนักเพิ่มขึ้น การให้ปุ๋ยคลอรีนแกดิน หรือการให้ปุ๋ยร่วมกับน้ำชลประทานที่มีเกลือสูง หรือการเติมเกลือลงไปดิน จะเป็นการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุโลหะหนักมากขึ้น อาจมีผลให้พืชดูดกินธาตุโลหะหนักที่มีในดินได้มากขึ้น (สุภมาศ, 2545)

10. การดูดกินและการสะสมโลหะหนักในพืช

สารพิษรวมทั้งโลหะหนัก หากปนเปื้อนอยู่ในสภาพแวดล้อมและดินที่ใช้ทำการเพาะปลูก จะถูกดูดซึมโดยพืช และสะสมอยู่ในส่วนต่างๆ ตามสัดส่วนที่มีอยู่ในดิน ด้วยเหตุนี้ การวัดปริมาณสารพิษที่สะสมอยู่ในพืชจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ประเมินความเป็นพิษของสารพิษที่มีอยู่ในดิน ซึ่งค่อนข้างชัดเจนแล้วว่าพืชต่างชนิดกัน หรือแม้แต่ชนิดเดียวกันแต่ต่างสายพันธุ์ ก็สามารถดูดซึมโลหะหนักได้แตกต่างกันไป อนึ่งโลหะหนักจะสะสมในส่วนต่างๆ ของพืชในปริมาณที่แตกต่างกันไป โดยทั่วไปมักพบในส่วนของราก มากกว่า ลำต้น ใบ และเมล็ดหรือส่วนที่ใช้ขยายพันธุ์ มักจะพบในปริมาณที่ต่ำที่สุด (ปรีดา และคณะ, 2547)

พิชิต และ สุรสิทธิ์ (2543) ได้เก็บตัวอย่างส่วนที่เป็นผลผลิตของพืชในบริเวณเดียวกับที่เก็บตัวอย่างดิน รวมทั้งเก็บตัวอย่างพืชจากตลาดต่างๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณของโลหะหนักในเมล็ด หรือส่วนที่นำไปบริโภคอื่นๆ ผลวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 9

11. การจำแนกระดับวงศ์ตามระบบอนุกรมวิธานดิน ลักษณะและสมบัติทั่วไปของชุดดินมวกเหล็ก

ชุดดินมวกเหล็ก (Muak Lek series) มีการจำแนกระดับวงศ์ คือ Ultic Haplustalfs, loamy-skeleton, mixed, shallow เป็นดินต้น เกิดจากการสลายตัวผุพังของหินดินดาน ลักษณะเนื้อดินบนเป็นดินร่วนปนทรายแป้ง สีน้ำตาลเข้มหรือน้ำตาลเข้มปนเทา ส่วนดินชั้นล่างเป็นดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง ปนกรวดหรือเศษหินสีน้ำตาลเข้ม หรือน้ำตาลเข้มปนเหลือง และจะพบชั้นเศษหินที่เป็นวัตถุต้นกำเนิดภายในความลึก 50 ซม. จากผิวดินบน ปฏิกิริยาดินบนเป็นกรดปานกลางถึงเป็นกลาง ค่าความเป็นกรดเป็นด่างอยู่ระหว่าง 6.0-7.0 ส่วนดินชั้นล่างเป็นกรดแก่ถึงเป็นกรดเล็กน้อย ค่าความเป็นกรดเป็นด่างอยู่ระหว่าง 5.0-6.5 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2541)

ตารางที่ 9 ความเข้มข้นของโลหะหนักในพืชชนิดต่างๆ

พืช	จำนวน ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (มก./กก.)			
		สารหนู	แคดเมียม	ตะกั่ว	ปรอท
ข้าวเจ้า	25	0.23-1.58	0.006-0.156	0.014-0.220	0.003-0.019
ข้าวเหนียว	44	0.24-1.79	0.002-0.140	0.014-0.555	0.003-0.012
ข้าวโพด	9	0.62-1.27	0.002-0.040	0.064-0.294	trace
ถั่วลิสง	37	0.35-3.85	0.004-0.283	0.016-0.408	0.002-0.010
กะหล่ำปลี	6	0.13-2.64	0.064-0.372	0.028-0.713	0.002-0.010
คะน้า	5	1.05-2.72	0.088-0.242	0.040-0.108	0.003-0.024
หัวหอม	5	0.50-1.08	0.034-0.482	0.054-0.418	0.003-0.023

ที่มา: พิชิต และ สุรสิทธิ์ (2543)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์การทดลองปลูกพืชในเรือนทดลอง

1.1 ตัวอย่างดิน

ดินที่ใช้ในการทดลองคือ ชุดดินมวกเหล็ก ซึ่งจำแนกอยู่ใน Ultic Haplustalfs, loamy-skeleton, mixed, shallow (กรมพัฒนาที่ดิน, 2541) เก็บที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร จากพื้นที่ปลูกข้าวโพดหวาน จ. นครราชสีมา

1.2 เมล็ดข้าวโพดหวานพันธุ์ ATS-5

1.3 ปุ๋ยหมัก

1.4 ปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1.4.1 ปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15 มี 15% N, 15% P_2O_5 และ 15% K_2O

1.4.2 ปุ๋ยยูเรีย (Urea ; $CO(NH_2)_2$) มี 46% N

1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในช่วงการปลูก

1.5.1 กระถางพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร สูง 24 เซนติเมตร พร้อมจานรองกระถาง

1.5.2 พลั่วมือ

1.5.3 ตาข่ายไนล่อน

1.5.4 ป้ายแสดงสิ่งทดลอง

1.5.5 บัวรดน้ำ

1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในช่วงการเก็บเกี่ยวผลผลิต

1.6.1 มีดสำหรับเก็บเกี่ยวตัวอย่างพืช

1.6.2 เครื่องชั่งน้ำหนักพืช

1.6.3 ถุงกระดาษสำหรับเก็บตัวอย่างพืช

1.7 อุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่างดิน

1.7.1 พลั่วมือ

1.7.2 ถุงพลาสติกใส่ตัวอย่างดิน

1.7.3 ป้ายผูกถุงตัวอย่าง และปากกาเขียนพลาสติกที่ลบไม่ออก

1.8 อุปกรณ์ที่จำเป็นอื่นๆ

2. อุปกรณ์การศึกษาในห้องปฏิบัติการ

2.1 Spectrophotometer (Spectronic 21)

2.2 Atomic absorption spectrophotometer

2.3 pH meter

2.4 Electrical conductivity meter

2.5 Micro Kjeldahl distillation apparatus

2.6 Digestion apparatus

2.7 Fume hood

2.8 เครื่องชั่ง 3 ตำแหน่ง

2.9 ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ

2.10 เครื่องบดตัวอย่างดิน และตะแกรงร่อนดิน ขนาด 2 และ 0.5 มิลลิเมตร

2.11 อุปกรณ์และสารเคมีที่จำเป็นในการวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างดิน และตัวอย่างพืช

วิธีการ

1. การทดลองปลูกพืชในกระถาง

1.1 การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ 3×2 Factorial in Completely Randomized Design จำนวน 3 ซ้ำ มี 2 ปัจจัย ดังนี้

ปัจจัยแรก คือ อัตราปุ๋ยหมัก ประกอบด้วย

1. ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก
2. ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม
3. ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม

ปัจจัยที่สอง คือ วิธีการใส่ปุ๋ยเคมี ประกอบด้วย

1. ใส่ปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15 อัตรา 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม + ยูเรีย 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม โดยใส่ครั้งเดียวพร้อมกันก่อนปลูก

2. ใส่ปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15 อัตรา 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม + ยูเรีย 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม โดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือก่อนปลูกและเมื่อข้าวโพดอายุ 20 วัน ครั้งละครึ่งของปริมาณทั้งหมด

โดยมีดำรับการทดลองดังนี้

ดำรับที่ 1 ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก + ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม + ยูเรีย 4 กรัม ต่อดิน 8 กิโลกรัม ใส่ครั้งเดียวพร้อมกันก่อนปลูก

ดำรับที่ 2 ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก + ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม + ยูเรีย 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม โดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือก่อนปลูกและเมื่อข้าวโพดอายุ 20 วัน ครั้งละครึ่งของปริมาณทั้งหมด

ดำรับที่ 3 ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม + ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม + ยูเรีย 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม ใส่ครั้งเดียวพร้อมกันก่อนปลูก

ดำรับที่ 4 ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม + ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม + ยูเรีย 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม โดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือก่อนปลูกและเมื่อข้าวโพดอายุ 20 วัน ครั้งละครึ่งของปริมาณทั้งหมด

ดำรับที่ 5 ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม + ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม + ยูเรีย 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม ใส่ครั้งเดียวพร้อมกันก่อนปลูก

ดำรับที่ 6 ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม + ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 4 กรัมต่อดิน 8 กิโลกรัม + ยูเรีย 4 กรัม ต่อดิน 8 กิโลกรัม โดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือก่อนปลูกและเมื่อข้าวโพดอายุ 20 วัน ครั้งละครึ่งของปริมาณทั้งหมด

1.2 การดำเนินการทดลอง

1.2.1 เตรียมดินปลูกข้าวโพดหวาน โดยชั่งดินใส่กระถางๆ ละ 8 กิโลกรัม จำนวน 18
กระถาง

1.2.2 คลุกปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมีตามแต่ละตำรับในดินก่อนปลูกและเมื่อข้าวโพดอายุได้
20 วัน

1.2.3 นำเมล็ดข้าวโพดมาปลูกในดินที่เตรียมไว้ รดด้วยน้ำทุกวันจนครบระยะเวลา 70
วัน

1.2.4 เก็บเกี่ยวผลผลิต

1.3 การเก็บตัวอย่างและการบันทึกข้อมูล

1.3.1 เก็บตัวอย่างดิน 1 ครั้ง คือ ดินหลังปลูก

1.3.2 วัดความสูงเมื่อข้าวโพดหวานอายุ 20, 40 และ 60 วัน ตามลำดับ

1.3.3 เก็บตัวอย่างข้าวโพดที่ระยะ 70 วัน โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ต้นและเมล็ด

1.3.4 ชั่งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นข้าวโพดหวาน

1.3.5 ชั่งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวโพดหวาน

1.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม SAS เพื่อหาค่า F-value หากข้อมูลแสดงความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ก็จะนำมาเปรียบเทียบหาความแตกต่างโดยใช้ DMRT (Duncan's new Multiple Range Test)

2. การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

2.1 การศึกษาสมบัติบางประการของตัวอย่างดินก่อนปลูก

การเตรียมตัวอย่างดิน โดยนำตัวอย่างดินที่เก็บในระดับความลึก 0- 15 เซนติเมตร มาผึ่งในที่ร่ม แล่อกเศษพืชออก นำไปบดให้ละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร นำไปวิเคราะห์ทางเคมีและเคมีไฟฟ้า ดังนี้

2.1.1 วัดค่าทางเคมีไฟฟ้า

1) ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) วัดโดยใช้ pH meter โดยใช้อัตราส่วนระหว่างดินและน้ำ เท่ากับ 1: 1

2) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) โดยวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายดินที่สกัดจากดินซึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation extract) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง Electric Conductivity

2.1.2 วิเคราะห์ทางเคมี

1) การวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Potassium) โดยนำดินมาสกัดด้วย 1N แอมโมเนียมอะซิเตต (NH_4OAc) ที่เป็นกลาง (pH 7.0) แล้ววัดหาปริมาณโพแทสเซียมด้วย Atomic Absorption Spectrophotometer (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

2) การวิเคราะห์ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Magnesium) โดยนำดินมาสกัดด้วย 1N แอมโมเนียมอะซิเตต (NH_4OAc) ที่เป็นกลาง (pH 7.0) แล้ววัดหาปริมาณแมกนีเซียมด้วย Atomic Absorption Spectrophotometer (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

3) การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Calcium) โดยนำดินมาสกัดด้วย 1N แอมโมเนียมอะซิเตต (NH_4OAc) ที่เป็นกลาง (pH 7.0) แล้ววัดหาปริมาณแคลเซียม ด้วย Atomic Absorption Spectrophotometer (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

4) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available Phosphorus) สกัดโดยวิธี Bray II (Bray and Kurt, 1945) และวิเคราะห์ปริมาณโดยวิธี Colorimetric (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

5) ปริมาณคาร์บอนและอินทรีย์วัตถุในดิน (Total C และ Organic matter) โดยวิธี Walkley and Black method (Walkley and Black, 1934 ; ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

2.1.3 วิเคราะห์ปริมาณตะกั่วและแคดเมียม

โดยวิเคราะห์ในรูปของปริมาณตะกั่วทั้งหมด (Total Pb) และปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total Cd) ในดิน โดยการย่อยสลายตัวอย่างดินด้วยวิธี wet oxidation โดยสกัดตัวอย่างดินด้วยกรดผสม HNO_3 : HClO_4 ในอัตราส่วน 5:2 แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว และแคดเมียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

2.1.4 วิเคราะห์ปริมาณปรอทและสารหนู

โดยวิเคราะห์ในรูปของปริมาณปรอททั้งหมด (Total Hg) และปริมาณสารหนูทั้งหมด (Total As) ในดิน โดยการย่อยสลายตัวอย่างดินด้วยวิธี wet oxidation โดยสกัดตัวอย่างดินด้วยกรดผสม H_2SO_4 : HNO_3 ในอัตราส่วน 2:1 เติม HCl , $(\text{NH}_2\text{OH})\cdot\text{H}_2\text{SO}_4$ และสารละลาย NaCl แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณปรอท และสารหนูด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer โดยระบบ Hg raptor ใน closed system (Stewart and Bettany, 1982)

2.2 การศึกษาสมบัติบางประการของปุ๋ยหมัก

การเตรียมตัวอย่างปุ๋ยหมัก โดยนำปุ๋ยหมักมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม แล้วนำมาบดให้ละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร นำไปวิเคราะห์ทางเคมีและเคมีไฟฟ้า ดังนี้

2.2.1 วัดค่าทางเคมีไฟฟ้า

- 1) ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) วัดโดยใช้ pH meter โดยใช้อัตราส่วนระหว่างดินและน้ำ เท่ากับ 1: 1
- 2) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) โดยวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายดินที่สกัดจากดินซึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation extract) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง Electric Conductivity

2.2.2 วิเคราะห์ทางเคมี

- 1) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen) ย่อยสลายด้วย Digestion mixture (H_2SO_4 - Na_2SO_4 -Se mixture) และวัดปริมาณโดยวิธี Kjeldahl method (Jackson, 1958)
- 2) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus) ย่อยสลายด้วย Digestion mixture (H_2SO_4 - Na_2SO_4 -Se mixture) และวัดปริมาณโดยวิธี Vanado-molybdate yellow color (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)
- 3) ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (Total Potassium) ย่อยสลายด้วย Digestion mixture (H_2SO_4 - Na_2SO_4 -Se mixture) และวัดปริมาณโดยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)
- 4) ปริมาณแคลเซียมทั้งหมด (Total Calcium) ย่อยสลายด้วย Acid mixture (HNO_3 - HClO_4 mixture) และวัดปริมาณโดยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

5) ปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมด (Total Magnesium) ย่อยสลายด้วย Acid mixture ($\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ mixture) และวัดปริมาณ โดยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

6) ปริมาณคาร์บอนและอินทรีย์วัตถุในดิน (Total C และ Organic matter) โดยวิธี Walkley and Black Titration (Walkley and Black, 1934 ; ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

2.3 การวิเคราะห์ตัวอย่างพืช

การเตรียมตัวอย่างพืช โดยนำตัวอย่างพืชไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ บดตัวอย่างพืชให้ละเอียด แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในส่วนต้นและเมล็ด

2.3.1 วิเคราะห์ปริมาณตะกั่วและแคดเมียม

โดยวิเคราะห์ในรูปของปริมาณตะกั่วทั้งหมด (Total Pb) และปริมาณแคดเมียมทั้งหมด (Total Cd) ในดิน โดยการย่อยสลายตัวอย่างดินด้วยวิธี wet oxidation โดยสกัดตัวอย่างดินด้วยกรดผสม $\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4$ ในอัตราส่วน 5:2 แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว และแคดเมียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (ทัศนีย์ และ จงรักษ์, 2542)

2.3.2 วิเคราะห์ปริมาณปรอทและสารหนู

โดยวิเคราะห์ในรูปของปริมาณปรอททั้งหมด (Total Hg) และปริมาณสารหนูทั้งหมด (Total As) ในดิน โดยการย่อยสลายตัวอย่างดินด้วยวิธี wet oxidation โดยสกัดตัวอย่างดินด้วยกรดผสม $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{HNO}_3$ ในอัตราส่วน 2:1 เติม HCl , $(\text{NH}_2\text{OH})\cdot\text{H}_2\text{SO}_4$ และสารละลาย NaCl แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณปรอท และสารหนูด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer โดยระบบ Hg raptor ใน closed system (Stewart and Bettany, 1982)

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม SAS เพื่อหาค่า F-value หากข้อมูลแสดงความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ก็จะนำมาเปรียบเทียบหาความแตกต่างโดยใช้ DMRT (Duncan's new Multiple Range Test)

3. สถานที่ทำการทดลอง

3.1 ทำการทดลองในโรงเรือนทดลองภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร

3.2 วิเคราะห์ทางเคมีที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร

4. ระยะเวลาในการทดลอง

การทดลองครั้งนี้เริ่มตั้งแต่วันที่เดือนสิงหาคม 2548 – มีนาคม 2549

ผลและวิจารณ์

ผล

1. การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

1.1 สมบัติของชุดดินมวกเหล็ก

สมบัติทางเคมี เคมีไฟฟ้า และสมบัติทางกายภาพของชุดดินมวกเหล็ก แสดงอยู่ในตารางที่ 10 พบว่าชุดดินมวกเหล็กมีเนื้อดินเป็นดินเหนียว มีปฏิกิริยาดินเป็นกลาง วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ได้ เท่ากับ 7.30 มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำมาก วัดได้ 0.29 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ปริมาณอินทรีย์วัตถุค่อนข้างสูง เท่ากับ 34 g kg^{-1} ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงมากเท่ากับ 258 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้สูงมาก เท่ากับ 629, 6,689 และ 282 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

1.2 สมบัติบางประการของปุ๋ยหมัก

สมบัติทางเคมี เคมีไฟฟ้า ของปุ๋ยหมักที่ใช้ในการทดลอง แสดงอยู่ในตารางที่ 11 พบว่าปุ๋ยหมักที่ใช้ในการทดลองมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในระดับเป็นกลาง วัดได้เท่ากับ 6.87 มีค่าการนำไฟฟ้าวัดได้ 1.07 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงมาก เท่ากับ 140.5 กรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณไนโตรเจนรวมต่ำ เท่ากับ 5.0 กรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำมากเท่ากับ 7.4 กรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำมาก เท่ากับ 6.2, 17.5 และ 10.8 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ สัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 16.30 เปอร์เซ็นต์ และมีความชื้นเท่ากับ 34.75 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 10 ค่าวิเคราะห์สมบัติบางประการของชุดดินมวกเหล็ก

สมบัติของดิน	ค่าวิเคราะห์
Texture ^{1/}	Clay
pH ^{2/}	7.30
EC (dS m ⁻¹) ^{3/}	0.29
OM (g kg ⁻¹) ^{4/}	34
Available P (mg kg ⁻¹) ^{5/}	258
Exchangeable K (mg kg ⁻¹) ^{6/}	629
Exchangeable Ca (mg kg ⁻¹) ^{6/}	6,689
Exchangeable Mg (mg kg ⁻¹) ^{6/}	282

1/ Hydrometer method

2/ วัดโดย pH meter 1:1 H₂O

3/ Saturation Water Extract

4/ Walkley and Black method

5/ Bray II

6/ Extract with 1N NH₄OAc pH 7.0

1.3 โลหะหนักในดินและปุ๋ยที่ใช้ทดลอง

จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในดินและปุ๋ยที่ใช้ทดลอง แสดงไว้ในตารางที่ 12 พบว่าดินมวกเหล็กมีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียม เท่ากับ 26.7 และ 8.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ และมีปริมาณความเข้มข้นของปรอทและสารหนู เท่ากับ 69.7 และ 3,835 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

ปุ๋ยหมักมีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียมเท่ากับ 79.5 และ 2.1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ และมีปริมาณความเข้มข้นของปรอทและสารหนูเท่ากับ 193 และ 644 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 มีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียมเท่ากับ 47.3 และ 2.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และมีปริมาณความเข้มข้นของปรอทและสารหนูเท่ากับ 113 และ 41 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

ปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0 มีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียมเท่ากับ 25 และ 0.4 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ และปริมาณความเข้มข้นของปรอทและสารหนูเท่ากับ 118 และ 62 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 11 ค่าวิเคราะห์พื้นฐานบางประการของปุ๋ยหมัก

สมบัติของปุ๋ยหมัก	ค่าวิเคราะห์
pH ^{1/}	6.87
EC (dS m ⁻¹) ^{2/}	1.07
OM (g kg ⁻¹) ^{3/}	140.5
Total N (g kg ⁻¹) ^{4/}	5.0
Total P (g kg ⁻¹) ^{5/}	7.4
Total K (g kg ⁻¹) ^{5/}	6.2
Total Ca (g kg ⁻¹) ^{6/}	17.5
Total Mg (g kg ⁻¹) ^{6/}	10.8
C/N ratio	16.30
Moisture (%)	34.75

1/ วัด โดย pH meter 1:1 H₂O

2/ วัด โดย Electric Conductometer 1:5 H₂O

3/ Walkley and Black method

4/ Kjeldahl method

5/ ย่อยสลายด้วย H₂SO₄-NaSO₄-Se mixture mixture และวัดปริมาณ โดยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer

6/ ย่อยสลายด้วย HNO₃-HClO₄ mixture และวัดปริมาณ โดยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer

ตารางที่ 12 ค่าวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในดินและปุ๋ยที่ใช้ในการทดลอง

โลหะหนัก	ค่าวิเคราะห์			
	ดินมวกเหล็ก	ปุ๋ยหมัก	ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15	ปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0
Pb(mg kg ⁻¹) ^{1/}	26.7	79.5	47.3	25.0
Cd(mg kg ⁻¹) ^{1/}	8.3	2.1	2.3	0.4
Hg(μg kg ⁻¹) ^{2/}	70	193	113	118
As(μg kg ⁻¹) ^{2/}	3,835	644	41	62

1/ ย่อยสลายด้วย HNO₃-HClO₄ mixture และวัดปริมาณโดยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer

2/ ย่อยสลายด้วย H₂SO₄-HNO₃ mixture และวัดปริมาณโดยเครื่อง Atomic absorption Spectrophotometer

2. น้ำหนักแห้งของข้าวโพดหวาน

2.1 น้ำหนักแห้งของต้นข้าวโพดหวาน

การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีอิทธิพลต่อน้ำหนักแห้งของต้นข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อน้ำหนักแห้งของต้นข้าวโพดหวาน ดังตารางที่ 13 พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีผลต่อน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของต้นข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของต้นข้าวโพดหวานสูงขึ้น คือเท่ากับ 132, 152 และ 158 กรัม/ต้น ตามลำดับ

การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ไม่ทำให้น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของต้นข้าวโพดหวานมีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยพบว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของต้นข้าวโพดหวานมีค่าเท่ากับ 142 และ 152 กรัม/ต้น ตามลำดับ

อัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อน้ำหนักแห้งของต้นข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าตำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้น้ำหนักแห้งของต้นข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวอย่างมีนัยสำคัญ ตำรับที่ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียว ไม่ทำให้น้ำหนักแห้งของต้นข้าวโพดหวานแตกต่างกับการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง

2.2 น้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวโพดหวาน

การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีอิทธิพลต่อน้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี ไม่มีอิทธิพลร่วมต่อน้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวโพดหวาน ดังตารางที่ 14 พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีผลต่อน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของเมล็ดข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการไม่ใส่ปุ๋ยหมัก ทำให้น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของเมล็ดข้าวโพดหวานต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของ

เมล็ดข้าวโพดหวานไม่แตกต่างกันทางสถิติ กล่าวคือ การไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของเมล็ดข้าวโพดหวานเท่ากับ 30.53, 43.24 และ 43.94 กรัม/ต้น ตามลำดับ

การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ไม่ทำให้น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของเมล็ดข้าวโพดหวานมีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยพบว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้น้ำหนักแห้งเฉลี่ยของเมล็ดข้าวโพดหวานต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือเท่ากับ 39.00 และ 39.47 กรัม ตามลำดับ

อัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมี ไม่มีอิทธิพลร่วมต่อน้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวโพดหวานที่ทำให้มีความแตกต่างกันทางสถิติ กล่าวคือ ดำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวไม่ทำให้น้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวโพดหวานแตกต่างกับการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง

ตารางที่ 13 น้ำหนักแห้งของต้นข้าวโพดหวาน (กรัม/ต้น)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	119 Bb	139 ABa	169 Aa	142
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	145 Ba	164 Aa	148 Ba	152
C-เฉลี่ย	132 B	152 AB	158 A	147
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		*		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
F-test (C×F)		*		
CV(%)		10.77		

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

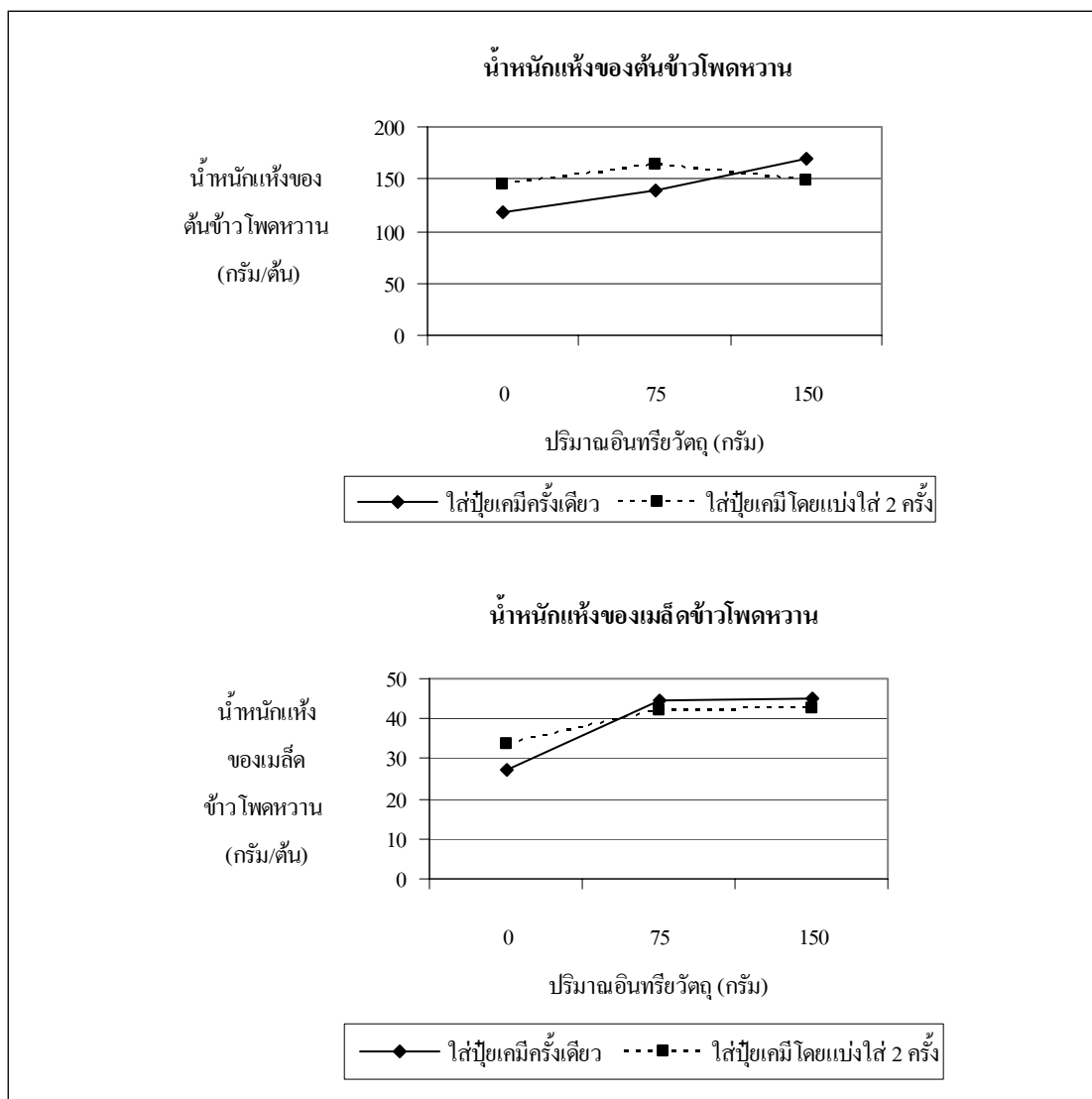
ตารางที่ 14 น้ำหนักแห้งเมล็ดข้าวโพดหวาน (กรัม/ต้น)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	27.32	44.40	45.28	39.00
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	33.74	42.08	42.59	39.47
C-เฉลี่ย	30.53 B	43.24 A	43.94 A	39.24
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		*		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
F-test (C×F)		ns		
CV(%)		13.65		

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

 ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT



ภาพที่ 1 อิทธิพลร่วมของอัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมีต่อน้ำหนักแห้งของต้นและเมล็ดข้าวโพดหวาน

3. ปริมาณโลหะหนักในส่วนต่างๆ ของข้าวโพดหวาน

3.1 ตะกั่ว

3.1.1 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน

การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีอิทธิพลต่อปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ และพบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน ดังแสดงในตารางที่ 15 พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีผลต่อปริมาณตะกั่วเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยการไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานสูงขึ้น คือเท่ากับ 6,705, 8,618 และ 10,963 ไมโครกรัม/ต้น ตามลำดับ

การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ไม่ทำให้ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานมีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยพบว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณตะกั่วเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในเมล็ดข้าวโพดหวานต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือเท่ากับ 8,531 และ 8,994 ไมโครกรัม/ต้น ตามลำดับ

อัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานที่ทำให้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยพบว่าดำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวอย่างมีนัยสำคัญ ดำรับที่ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียว ไม่ทำให้ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานแตกต่างกับการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง และพบว่าดำรับที่ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียว ทำให้ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง อย่างมีนัยสำคัญ

3.1.2 ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในต้นข้าวโพดหวาน

การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีอิทธิพลต่อปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในต้นข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่า การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี ไม่มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในต้นของข้าวโพดหวาน ดังแสดงในตารางที่ 16 พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วในต้นข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญ โดยการไม่ใส่ปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วในต้นข้าวโพดหวานไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วในต้นข้าวโพดหวานสูงกว่าการไม่ใส่ปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัม/ดิน 8 กก. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ การไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วในต้นข้าวโพดหวานเท่ากับ 33.75, 40.63 และ 52.08 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ไม่ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วในต้นข้าวโพดหวานมีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยพบว่า การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วในต้นข้าวโพดหวานต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือเท่ากับ 39.58 และ 44.72 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

อัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมี ไม่มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในต้นข้าวโพดหวานที่ทำให้มีความแตกต่างกันทางสถิติ กล่าวคือ ดำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวไม่ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในต้นข้าวโพดหวานแตกต่างกับการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง

3.1.3 ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในเมล็ดข้าวโพดหวาน

การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี ไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในเมล็ดข้าวโพดหวานที่ทำให้มีความแตกต่างกันทางสถิติ และพบว่า การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี ไม่มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในเมล็ดของข้าวโพดหวาน ดังแสดงในตารางที่ 17 พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ ไม่ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วในต้นข้าวโพดหวานแตกต่างกันทางสถิติ โดยการไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, การใส่ปุ๋ย

หมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วในเมล็ดข้าวโพดหวานลดลง คือเท่ากับ 54.58, 52.92 และ 49.79 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ไม่ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วในเมล็ดข้าวโพดหวานมีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยพบว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียว ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วในเมล็ดข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือเท่ากับ 53.19 และ 51.67 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

อัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมี ไม่มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในเมล็ดข้าวโพดหวานที่ทำให้มีความแตกต่างกันทางสถิติ กล่าวคือ ดำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียว ไม่ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในเมล็ดข้าวโพดหวานแตกต่างกับการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง

ตารางที่ 15 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/ต้น)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	4,370 Cb	8,595 Ba	12,628 Aa	8,531
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	9,041 Aa	8,642 Aa	9,299 Ab	8,994
C-เฉลี่ย	6,705 C	8,618 B	10,963 A	8,762
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		**		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
F-test (C×F)		**		
CV(%)		9.73		

หมายเหตุ ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางที่ 16 ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในต้นข้าวโพดหวาน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	25.00	40.83	52.92	39.58
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	42.50	40.42	51.25	44.72
C-เฉลี่ย	33.75 B	40.63 B	52.08 A	42.15
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		*		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
F-test (C×F)		ns		
CV(%)		18.95		

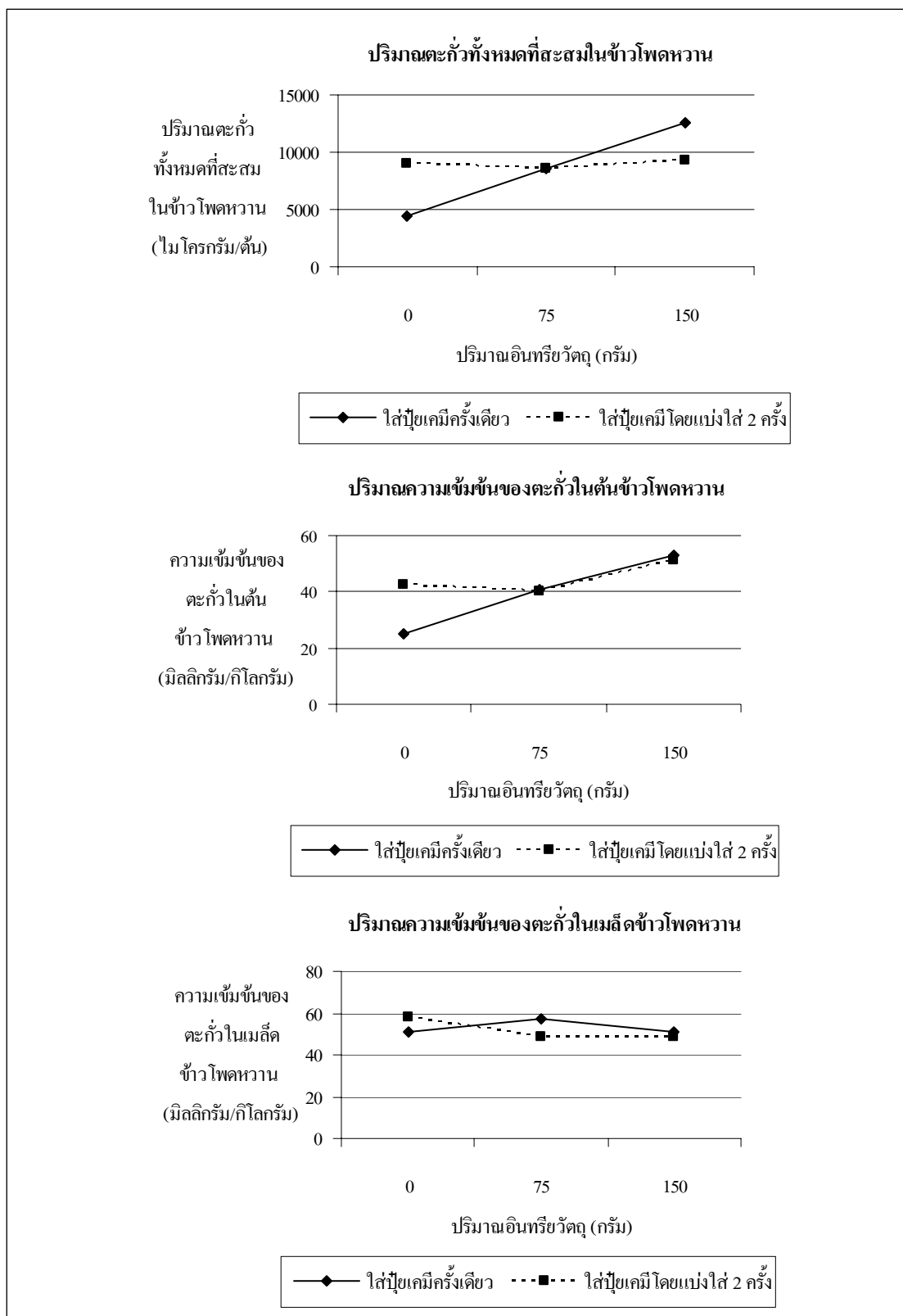
หมายเหตุ * = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางที่ 17 ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในเมล็ดข้าวโพดหวาน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	50.83	57.50	51.25	53.19
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	58.33	48.33	48.33	51.67
C-เฉลี่ย	54.58	52.92	49.79	52.43
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)	ns			
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)	ns			
F-test (C×F)	ns			
CV(%)	13.64			

หมายเหตุ ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ



ภาพที่ 2 อิทธิพลร่วมของอัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่สะสม, ความเข้มข้นของตะกั่วในต้นและเมล็ดข้าวโพดหวาน

3.2 แคลเมียม

3.2.1 ปริมาณแคลเมียมทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน

การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีอิทธิพลต่อปริมาณแคลเมียมทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ และพบว่า การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณแคลเมียมทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน ดังแสดงในตารางที่ 18 พบว่า การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีผลต่อปริมาณแคลเมียมเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยการไม่ใส่ปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณแคลเมียมเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณแคลเมียมเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานสูงกว่าการไม่ใส่ปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัม/ดิน 8 กก. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ การไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณแคลเมียมเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานสูงขึ้น คือเท่ากับ 82.9, 96.7 และ 133.9 ไมโครกรัม/ต้น ตามลำดับ

การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ไม่ทำให้ปริมาณแคลเมียมเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานมีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยพบว่า การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวมีผลทำให้ปริมาณแคลเมียมเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือมีค่า 101.5 และ 107.5 ไมโครกรัม/ต้น ตามลำดับ

อัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณแคลเมียมทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยพบว่า ดำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณแคลเมียมทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ดำรับที่ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณแคลเมียมทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง อย่างมีนัยสำคัญ และดำรับที่ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวไม่ทำให้ปริมาณแคลเมียมทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานแตกต่างกับการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง

3.2.2 ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในต้นข้าวโพดหวาน

การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีอิทธิพลต่อปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในต้นข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่า การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในต้นของข้าวโพดหวาน ดังแสดงในตารางที่ 19 พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในต้นข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญ โดยการไม่ใส่ปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในต้นข้าวโพดหวานไม่แตกต่างกันทางสถิติ การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในต้นข้าวโพดหวานสูงกว่าการไม่ใส่ปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัม/ดิน 8 กก. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ การไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในต้นข้าวโพดหวานเท่ากับ 0.51, 0.61 และ 0.73 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ไม่ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในต้นข้าวโพดหวานมีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยพบว่า การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในต้นข้าวโพดหวานต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือเท่ากับ 0.60 และ 0.63 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

อัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในต้นข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่า ดำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในต้นข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวอย่างมีนัยสำคัญ แต่ดำรับที่ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในต้นข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง อย่างมีนัยสำคัญ และพบว่า ดำรับที่ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวไม่ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในต้นข้าวโพดหวานแตกต่างกับการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง

3.2.3 ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในเมล็ดข้าวโพดหวาน

การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีอิทธิพลต่อปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในเมล็ดข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในเมล็ดข้าวโพดหวาน ดังแสดงในตารางที่ 20 พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในเมล็ดข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าการไม่ใส่ปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในเมล็ดข้าวโพดหวานไม่แตกต่างกันทางสถิติ การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในเมล็ดข้าวโพดหวานต่ำกว่าการไม่ใส่ปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัม/ดิน 8 กก. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ไม่ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในเมล็ดข้าวโพดหวานมีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยพบว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในเมล็ดข้าวโพดหวานต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือเท่ากับ 0.32 และ 0.34 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

อัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในเมล็ดข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าตำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวไม่ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในเมล็ดข้าวโพดหวานแตกต่างกับการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ตำรับที่ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในเมล็ดข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง อย่างมีนัยสำคัญ แต่ตำรับที่ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในเมล็ดข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 18 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/ต้น)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	38.5 Bb	123.6 Aa	142.4 Aa	101.5
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	127.2 Aa	69.9 Bb	125.4 Aa	107.5
C-เฉลี่ย	82.9 B	96.7 B	133.9 A	104.5
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		**		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
F-test (C×F)		**		
CV(%)		16.71		

หมายเหตุ ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางที่ 19 ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในต้นข้าวโพดหวาน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	0.23 Bb	0.79 Aa	0.76 Aa	0.60
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	0.78 Aa	0.41 Bb	0.70 Aa	0.63
C-เฉลี่ย	0.51 B	0.61 B	0.73 A	0.62
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		*		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
F-test (C×F)		**		
CV(%)		13.28		

หมายเหตุ	*	=	มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
	**	=	มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
	ns	=	ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

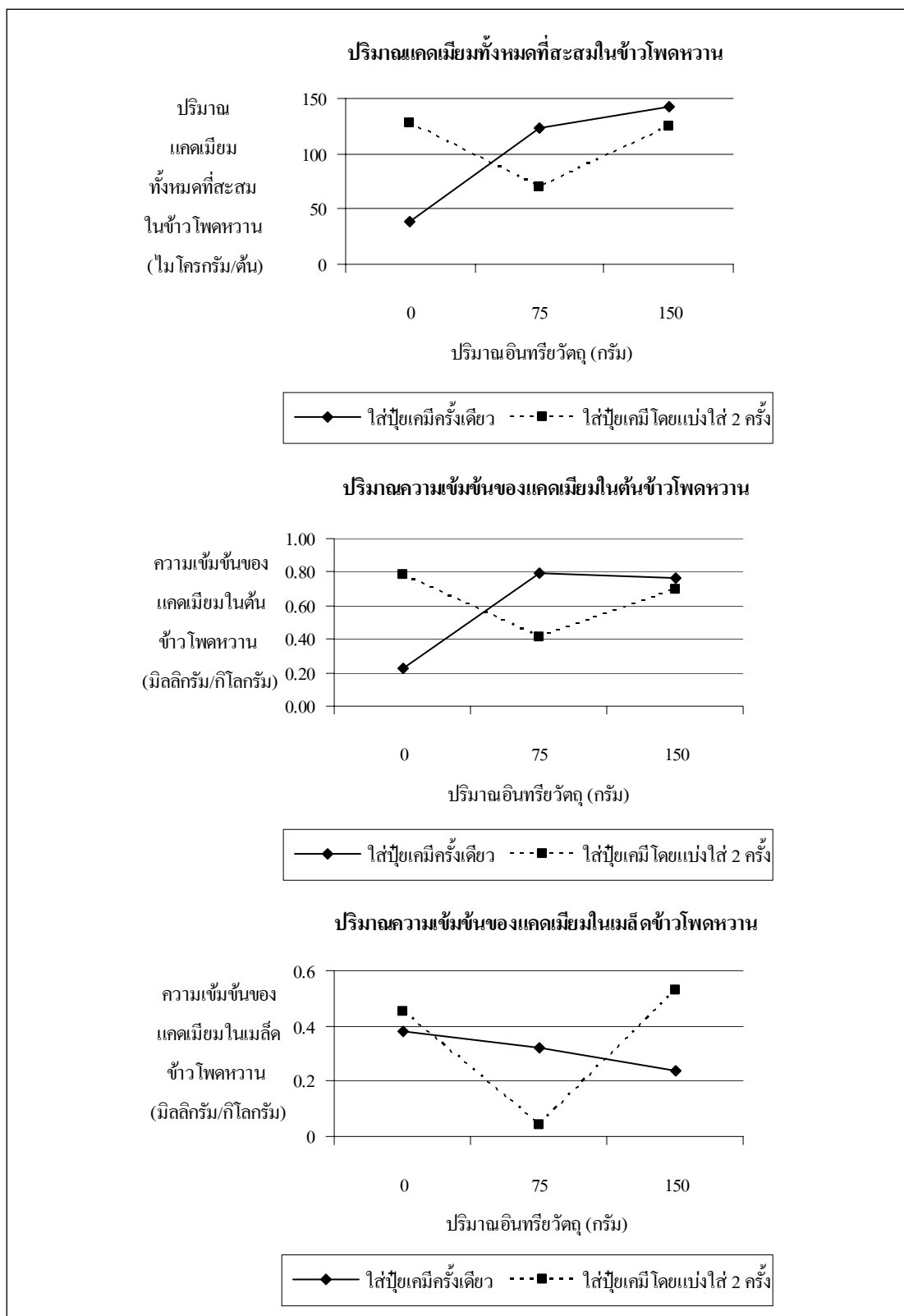
ตารางที่ 20 ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในเมล็ดข้าวโพดหวาน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	0.38 Aa	0.32 ABa	0.24 Bb	0.32
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	0.45 Aa	0.04 Bb	0.53 Aa	0.34
C-เฉลี่ย	0.42 A	0.18 B	0.39 A	0.33
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		**		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
F-test (C×F)		**		
CV(%)		20.02		

หมายเหตุ ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
 ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT



ภาพที่ 3 อิทธิพลร่วมของอัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณแคดเมียมทั้งหมดที่สะสม, ความเข้มข้นของแคดเมียมในต้นและเมล็ดข้าวโพดหวาน

3.3 พรอท

3.3.1 ปริมาณพรอททั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน

การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีอิทธิพลต่อปริมาณพรอททั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ และพบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณพรอททั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน ดังแสดงในตารางที่ 21 การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีผลต่อปริมาณพรอทเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยพบว่าการไม่ใส่ปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณพรอทเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานสูงขึ้น คือเท่ากับ 19.6, 27.5 และ 33.2 ไมโครกรัม/ต้น ตามลำดับ

การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ไม่ทำให้ปริมาณพรอทเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานมีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยพบว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณพรอทเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือเท่ากับ 27.7 และ 25.8 ไมโครกรัม/ต้น ตามลำดับ

อัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณพรอททั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าดำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยหมักและใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณพรอททั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง แต่ดำรับที่ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณพรอททั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียว

3.3.2 ปริมาณความเข้มข้นของพรอทในต้นข้าวโพดหวาน

การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลต่อปริมาณความเข้มข้นของพรอทในต้นข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ และพบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของพรอทในต้นข้าวโพดหวาน ดังแสดงในตารางที่ 22 พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของพรอทในต้นข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยการไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150

กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของปรอทในต้นข้าวโพดหวานสูงขึ้น คือเท่ากับ 132, 154 และ 182 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของปรอทในต้นข้าวโพดหวานมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของปรอทในต้นข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือเท่ากับ 165 และ 147 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

อัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของปรอทในต้นข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าค่ารับที่ไม่ใส่ปุ๋ยหมักและใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณความเข้มข้นของปรอทในต้นข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง อย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่ารับที่ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของปรอทในต้นข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวอย่างมีนัยสำคัญ

3.3.3 ปริมาณความเข้มข้นของปรอทในเมล็ดข้าวโพดหวาน

การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีอิทธิพลต่อปริมาณความเข้มข้นของปรอทในเมล็ดข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของปรอทในเมล็ดข้าวโพดหวาน ดังแสดงในตารางที่ 23 พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของปรอทในเมล็ดข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการไม่ใส่ปุ๋ยหมัก ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของปรอทในเมล็ดข้าวโพดหวานต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของปรอทในเมล็ดข้าวโพดหวานไม่แตกต่างกันทางสถิติ กล่าวคือ การไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของปรอทในเมล็ดข้าวโพดหวานเท่ากับ 79.7, 90.4 และ 90.9 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ไม่ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของปรอทในเมล็ดข้าวโพดหวานมีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยพบว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของปรอทในเมล็ดข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือเท่ากับ 90.3 และ 83.8 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

อัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของปรอทในเมล็ดข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าตำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยหมักและใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณความเข้มข้นของปรอทในเมล็ดข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง อย่างมีนัยสำคัญ แต่ตำรับที่ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของปรอทในเมล็ดข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 21 ปริมาณปรอททั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/ต้น)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	19.9 Ba	23.7 Ba	39.4 Aa	27.7
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	19.2 Ba	31.2 Aa	27.1 Aa	25.8
C-เฉลี่ย	19.6 C	27.5 B	33.2 A	26.7
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		**		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
F-test (C×F)		*		
CV(%)		15.68		

หมายเหตุ	*	=	มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
	**	=	มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
	ns	=	ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางที่ 22 ปริมาณความเข้มข้นของโปรตีนในต้นข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/กิโลกรัม)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	146 Ba	138 Bb	211 Aa	165 a
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	117 Bb	170 Aa	153 Ab	147 b
C-เฉลี่ย	132 C	154 B	182 A	156
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		**		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		*		
F-test (C×F)		**		
CV(%)		8.18		

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

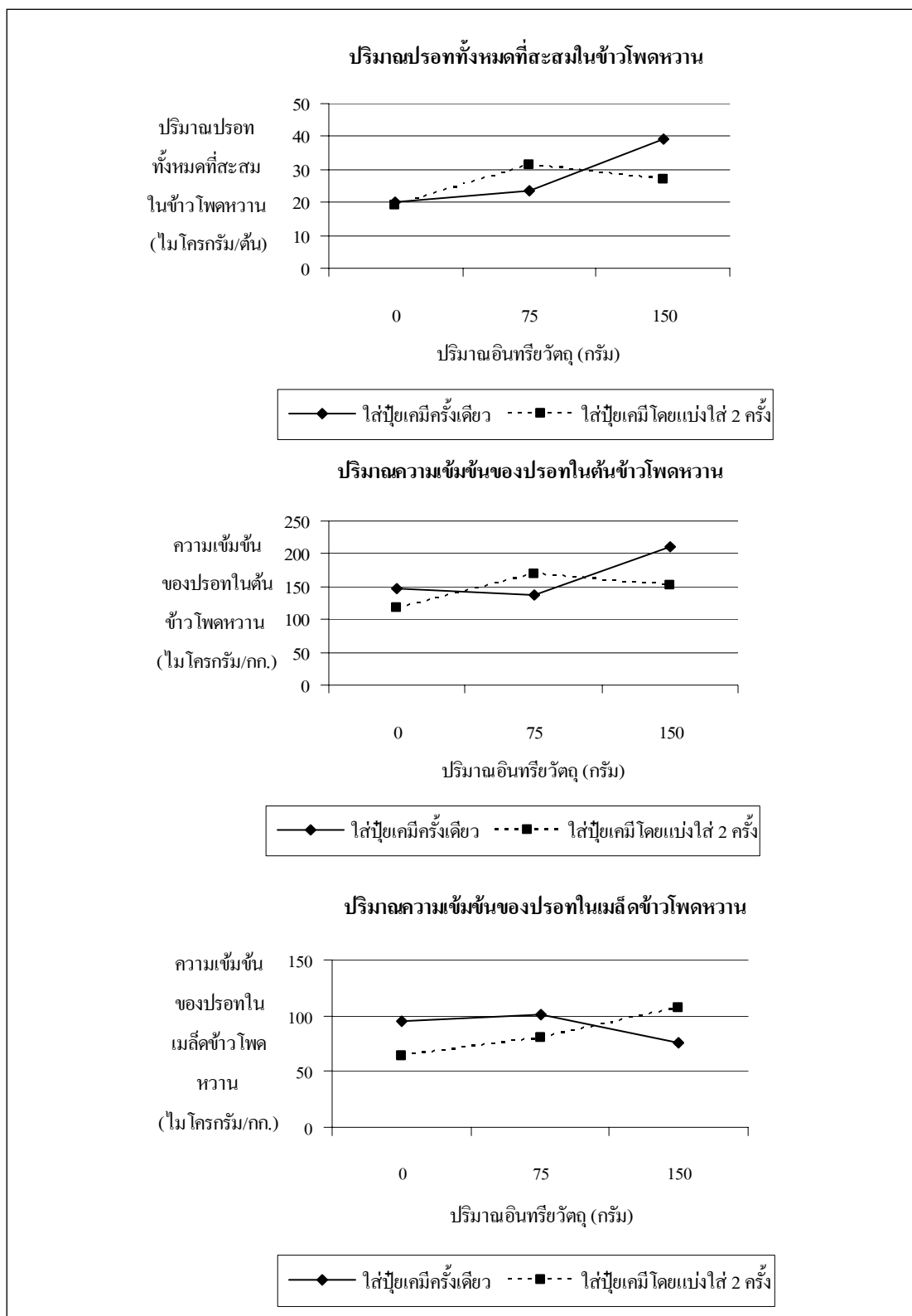
ตารางที่ 23 ปริมาณความเข้มข้นของโปรทในเมล็ดข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/กิโลกรัม)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	94.8 Aa	100.9 Aa	75.1 Bb	90.3
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	64.6 Bb	79.9 Bb	106.8 Aa	83.8
C-เฉลี่ย	79.7 B	90.4 A	90.9 A	87.0
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)	*			
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)	ns			
F-test (C×F)	**			
CV(%)	7.39			

หมายเหตุ	*	=	มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
	**	=	มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
	ns	=	ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT



ภาพที่ 4 อิทธิพลร่วมของอัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณปรอททั้งหมดที่สะสม, ความเข้มข้นของปรอทในต้นและเมล็ดข้าวโพดหวาน

3.4 สารหนู

3.4.1 ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน

การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลต่อปริมาณสารหนูทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณสารหนูทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน ดังแสดงในตารางที่ 24 พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีผลต่อปริมาณสารหนูเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการไม่ใส่ปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณสารหนูเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานมีค่าสูงขึ้น คือ เท่ากับ 24.9, 47.2 และ 63.3 ไมโครกรัม/ต้น ตามลำดับ

การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณสารหนูเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณสารหนูเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือเท่ากับ 35.1 และ 55.2 ไมโครกรัม/ต้น ตามลำดับ

อัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณสารหนูทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าค่ารับที่ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวอย่างมีนัยสำคัญ

3.4.2 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในต้นข้าวโพดหวาน

การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในต้นข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในต้นข้าวโพดหวาน ดังแสดงในตารางที่ 25 พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูในต้นข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการไม่ใส่ปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75

และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูในต้นข้าวโพดหวานสูงขึ้น คือ เท่ากับ 150, 231 และ 319 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูในต้นข้าวโพดหวานมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่า การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูในต้นข้าวโพดหวานต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง

อัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในต้นของข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่าตำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, ใส่ปุ๋ยหมัก อัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในต้นของข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวอย่างมีนัยสำคัญ

3.4.2 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในเมล็ดข้าวโพดหวาน

การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลต่อปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในเมล็ดข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่า การใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ และการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในเมล็ดข้าวโพดหวาน ดังแสดงในตารางที่ 26 พบว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตราต่างๆ มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูในเมล็ดข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการไม่ใส่ปุ๋ยหมัก ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูในเมล็ดข้าวโพดหวานต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูในเมล็ดข้าวโพดหวานไม่แตกต่างกันทางสถิติ กล่าวคือ การไม่ใส่ปุ๋ยหมัก, การใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 และ 150 กรัม/ดิน 8 กก. ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูในเมล็ดข้าวโพดหวานเท่ากับ 156, 266 และ 315 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวและการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูในเมล็ดข้าวโพดหวานมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพบว่า การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวทำให้ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของสารหนูในเมล็ดข้าวโพดหวานต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง คือเท่ากับ 203 และ 288 ไมโครกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

อัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมี มีอิทธิพลร่วมต่อปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในเมล็ดข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยพบว่าค่ารับที่ไม่ใส่ปุ๋ยหมักและใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 75 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียว ไม่ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในเมล็ดข้าวโพดหวานแตกต่างกับการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง แต่ค่ารับที่ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 150 กรัม/ดิน 8 กก. การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในเมล็ดข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 24 ปริมาณสารหนุ้ทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/ต้น)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	19.1 Cb	33.1 Bb	53.2 Ab	35.1 b
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	30.8 Ca	61.4 Ba	73.5 Aa	55.2 a
C-เฉลี่ย	24.9 C	47.2 B	63.3 A	45.2
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		**		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		**		
F-test (C×F)		*		
CV(%)		10.91		

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ในสคมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางที่ 25 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในต้นข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/กิโลกรัม)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	124 Bb	159 Bb	263 Ab	182 b
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	176 Ca	303 Ba	375 Aa	285 a
C-เฉลี่ย	150 C	231 B	319 A	233
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		**		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		**		
F-test (C×F)		*		
CV(%)		10.03		

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

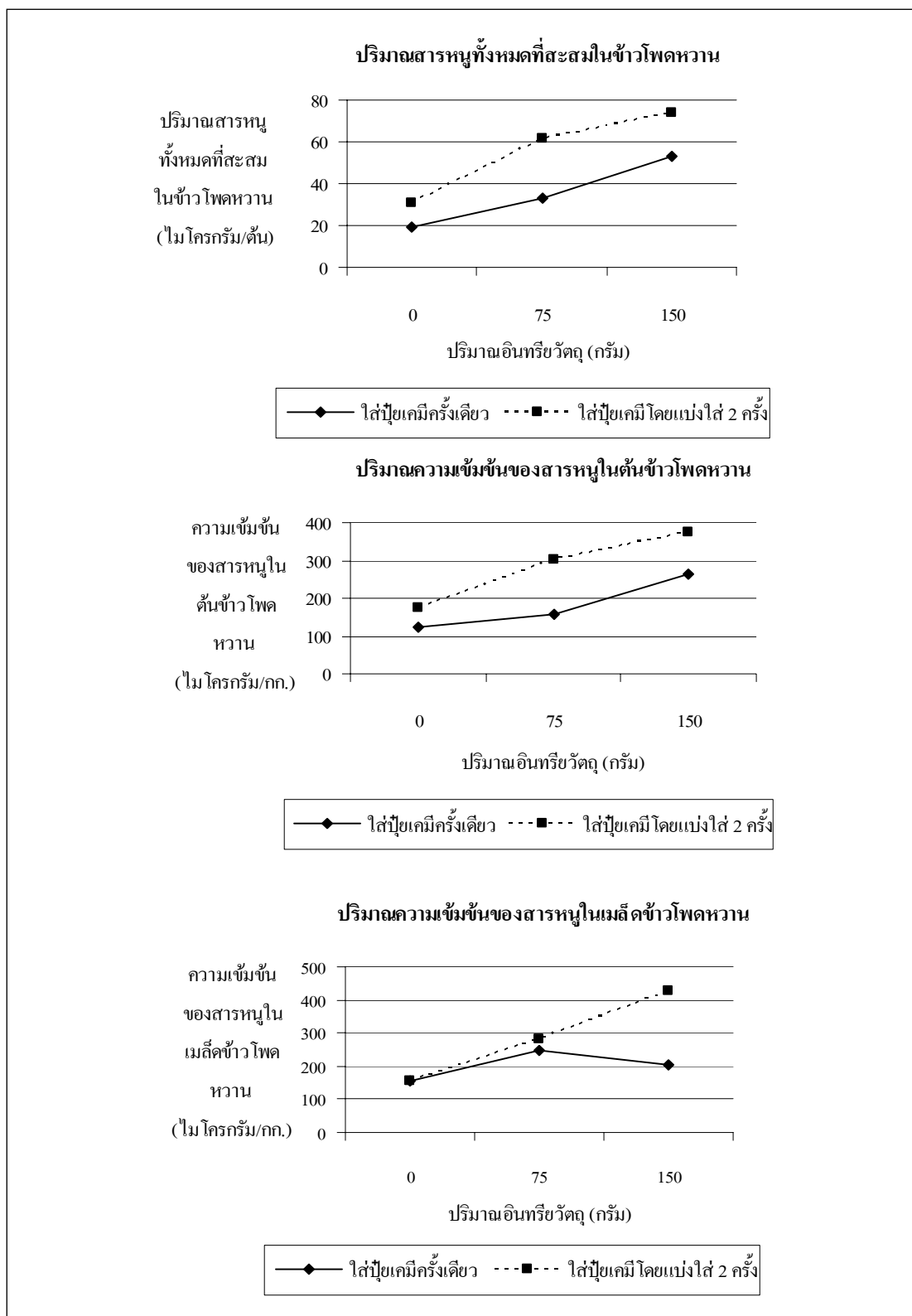
ตารางที่ 26 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในเมล็ดข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/กิโลกรัม)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	157 Aa	250 Aa	202 Ab	203 b
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	155 Ca	282 Ba	428 Aa	288 a
C-เฉลี่ย	156 B	266 A	315 A	246
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		**		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		**		
F-test (C×F)		**		
CV(%)		16.26		

หมายเหตุ ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT



ภาพที่ 5 อิทธิพลร่วมของอัตราปุ๋ยหมักและการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณสารหนูทั้งหมดที่สะสม, ความเข้มข้นของสารหนูในต้นและเมล็ดข้าวโพดหวาน

วิจารณ์

1. ผลของปุ๋ยหมักต่อปริมาณโลหะหนักทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน

จากการศึกษาพบว่า การใส่ปุ๋ยหมักอัตราสูงขึ้นไป ทำให้ปริมาณตะกั่ว แคดเมียม โปรท และ สารหนูเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เพราะเมื่อปุ๋ยหมักถูกย่อยสลาย อาจปลดปล่อยสารบางชนิดที่มีคุณสมบัติเป็นฮอร์โมนส่งเสริมการเจริญเติบโตของรากข้าวโพดหวาน รวมทั้งการใส่ปุ๋ยหมักทำให้ดินมีความร่วนซุยมากขึ้น การระบายน้ำและอากาศของดินดีขึ้น ทำให้ข้าวโพดหวานมีระบบรากดีขึ้น โอกาสที่รากของข้าวโพดหวานจะดูดกิน ตะกั่ว แคดเมียม โปรท และสารหนูจากดินและเคลื่อนย้ายธาตุเหล่านี้ไปสะสมในส่วนต่างๆ จึงมีมากขึ้นด้วย

2. ผลของการใส่ปุ๋ยเคมีต่อปริมาณโลหะหนักทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวาน

จากการศึกษาพบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี ไม่ทำให้ปริมาณตะกั่ว แคดเมียม และโปรทเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานแตกต่างกันทางสถิติ แต่พบว่าการใส่ปุ๋ยเคมี มีผลต่อปริมาณสารหนูเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ปริมาณสารหนูเฉลี่ยทั้งหมดที่สะสมในข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียว ทั้งนี้เพราะสารหนูในดินมักอยู่ในรูปแอนไอออน โดยที่อาร์ซีนัด (AsO_4^{3-}) มีนิสัยคล้ายฟอสเฟต ฉะนั้น การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียวในปริมาณมาก ทำให้ดินมีความเข้มข้นของฟอสเฟตสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ฟอสเฟตจึงไปแข่งขันกับอาร์ซีนัด ทำให้พืชดูดกินอาร์ซีนัดได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ ศุภมาส (2545) ที่กล่าวว่า การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตช่วยลดการดูดกินสารหนูของพืชได้

3. ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในส่วนต่างๆ ของข้าวโพดหวาน

ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในส่วนต่างๆ ของข้าวโพดหวานมีความผันแปรอย่างมาก อาจสูงหรือต่ำก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยสภาพแวดล้อม เช่น ปริมาณโลหะหนักในดิน การเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล และพันธุ์พืชที่มีความสามารถในการสะสมโลหะหนัก (Pendias and Pendias, 1992) อีกทั้งการที่ธาตุโลหะหนักแต่ละตัวจะมีความเข้มข้นในส่วนต้นและเมล็ดมากน้อยอย่างไร ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะหรือพฤติกรรมของธาตุโลหะหนักนั้นๆ เช่น สภาพการเคลื่อนที่ได้

ในดินของธาตุโลหะหนักนั้นๆ และสภาพการเคลื่อนที่ได้ของโลหะหนักแต่ละตัวในส่วนต่างๆ ของข้าวโพดหวาน ซึ่งอาจถูกควบคุมโดยปัจจัยด้านพันธุกรรมของพืชแต่ละชนิดเช่นกัน และค่อนข้างชัดเจนแล้วว่าพืชที่ต่างชนิดกัน หรือแม้แต่นชนิดเดียวกันแต่ต่างสายพันธุ์ ก็สามารถดูดกินโลหะหนักได้แตกต่างกัน (ปริดา และคณะ, 2547)

4. ปริมาณการสะสมโลหะหนักในส่วนต่างๆ ของข้าวโพดหวาน

ปริมาณการสะสมโลหะหนักในส่วนต่างๆ ของข้าวโพดหวานจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักและน้ำหนักแห้งของส่วนนั้นๆ ของข้าวโพดหวานที่นำมาศึกษา จากการศึกษาพบว่าปริมาณการสะสมโลหะหนักในส่วนต้นสูงกว่าในส่วนเมล็ดของข้าวโพดหวาน ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำหนักแห้งของต้นข้าวโพดหวานมากกว่าส่วนเมล็ด ซึ่งสอดคล้องกับ Zimdahl and Skogerboe (1977) ที่ได้ทำการทดลองการสะสมปริมาณตะกั่วในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของข้าวโพด และรายงานว่าส่วนรากมีปริมาณการสะสมตะกั่วมากที่สุด รองลงมาคือ ช่อ ใบ ลำต้น และฝัก ตามลำดับ เช่นเดียวกับ สุภมาศ (2545) ที่กล่าวว่าแคดเมียมจะมีการสะสมที่รากมากที่สุด รองลงมาคือสะสมในใบและมีการเคลื่อนย้ายสู่เมล็ดได้น้อย และ Pendias and Pendias (1992) รายงานว่ารากพืชเป็นส่วนที่มีการสะสมปรอทมากที่สุด รองลงมาคือใบและเมล็ด ตามลำดับ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาผลของการใส่ปุ๋ยหมักและเวลาในการใส่ปุ๋ยเคมีต่อการดูดกินและสะสมโลหะหนักในข้าวโพดหวานที่ปลูกในชุดดินมวกเหล็ก สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ชุดดินมวกเหล็กที่นำมาศึกษามีเนื้อดินเป็นดินเหนียว (clay) มีปฏิกิริยาดินเป็นกลาง pH เท่ากับ 7.3 ค่าการนำไฟฟ้าต่ำมาก ปริมาณอินทรีย์วัตถุค่อนข้างสูง ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้สูงมาก
2. ชุดดินมวกเหล็กที่นำมาศึกษามีปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วและแคดเมียม เท่ากับ 26.7 และ 8.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม มีปริมาณความเข้มข้นของปรอทและสารหนูเท่ากับ 70 และ 3,835 ไมโครกรัม/กิโลกรัม
3. ปุ๋ยหมักที่นำมาใช้ศึกษามีความเป็นกรด-ด่าง ในระดับเป็นกลาง ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 1.06 เดซิซีเมนต์/เมตร ปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงมาก ปริมาณไนโตรเจนรวมและฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำ ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำมาก
4. การใส่ปุ๋ยหมัก ทำให้ปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักในดินและเมล็ด, ปริมาณโลหะหนักที่สะสมในดินและเมล็ด และปริมาณโลหะหนักที่สะสมทั้งหมดในข้าวโพดหวานที่ปลูกในชุดดินมวกเหล็กสูงขึ้น
5. การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ความเข้มข้นของปรอทในต้นข้าวโพดหวานต่ำกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียว แต่การใส่ปุ๋ยเคมีโดยแบ่งใส่ 2 ครั้ง ทำให้ความเข้มข้นของสารหนูในดินและเมล็ดข้าวโพดหวาน ปริมาณสารหนูที่สะสมในดินและเมล็ดข้าวโพดหวาน และปริมาณสารหนูที่สะสมทั้งหมดในข้าวโพดหวานสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีครั้งเดียว
6. ความเข้มข้นของตะกั่วและสารหนูในส่วนต้นต่ำกว่าในส่วนเมล็ดของข้าวโพดหวาน แต่ความเข้มข้นของแคดเมียมและปรอทในส่วนต้นสูงกว่าในส่วนเมล็ดของข้าวโพดหวาน

7. ปริมาณการสะสมตะกั่ว แคดเมียม ปรอท และสารหนูในส่วนต้นสูงกว่าในส่วนเมล็ดของข้าวโพดหวาน

8. ความเข้มข้นของตะกั่วและปรอทในต้นและเมล็ดข้าวโพดหวานมีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดให้มีได้ในอาหารคือ 1 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

9. ความเข้มข้นของแคดเมียมและสารหนูในต้นและเมล็ดข้าวโพดหวานต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดคือ 0.8 และ 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลของการใส่ปุ๋ยหมักและเวลาในการใส่ปุ๋ยเคมีต่อการดูดกินและสะสมโลหะหนักในข้าวโพดหวานที่ปลูกในชุดดินมากเหล็ก มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ควรทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่ว แคดเมียม ปรอท และสารหนูในดินหลังการปลูกข้าวโพดหวาน เพื่อจะได้ทราบว่าในดินมีธาตุเหล่านี้เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างไร

2. ค่ามาตรฐานอาหารของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข ที่นำมาเปรียบเทียบนี้ไม่ได้ระบุว่าเป็นอาหารประเภทใดชนิดใด เป็นการเปรียบเทียบเพื่อดูแนวโน้มเท่านั้น

3. ควรส่งเสริมให้เกษตรกรทำปุ๋ยหมักเองและเลือกใช้วัสดุที่ไม่มีโลหะหนักปะปนหรือมีโลหะหนักปะปนในปริมาณที่น้อยที่สุด หรือมีการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในปุ๋ยหมักก่อนนำมาใช้

4. อุปกรณ์ต่างๆ และน้ำที่ใช้ในระหว่างการผลิตไม่ควรมีธาตุโลหะหนักปนเปื้อนหรือปนเปื้อนน้อยที่สุด

5. ควรมีการทดลองในสภาพไร่ เพื่อผลที่จะนำไปใช้จริง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2541. สารหนู (Arsenic). ครั้งที่ 2. กรมควบคุมมลพิษ
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2541. รายงานการจัดการทรัพยากรดินเพื่อการปลูกพืชเศรษฐกิจหลักตามกลุ่ม
ชุดดิน. ดินบนพื้นที่ดอน. แหล่งที่มา: www.idd.go.th, 2 สิงหาคม 2548.

กรมวิชาการเกษตร. 2545. เกษตรดีที่เหมาะสมสำหรับข้าวโพดหวาน. ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ชุมนุม
สหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด, กรุงเทพฯ.

กระทรวงสาธารณสุข. 2529. มาตรฐานอาหารที่มีการปนเปื้อน, ใน ประกาศกระทรวงสาธารณสุข
ฉบับที่ 98 (2529).

กองตรวจโรงงาน. 2527. การป้องกันอันตรายจากตะกั่วโรงงาน. กรมโรงงานอุตสาหกรรม 4 (1):
61-73.

กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม. 2530. สารหนู. สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ,
กรุงเทพฯ.

กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม. 2532. แคดเมียม. สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม
แห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

กองอาชีวอนามัย. 2521. อันตรายจากโครเมียมและปรอท. กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.

_____. 2532. แคดเมียม. สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

กุลยา จงศิริลักษณ์. 2534. เคมีสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยรามคำแหง, กรุงเทพฯ.

- เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. 2546. **ของเสียอันตราย**. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย
รังสิต, กรุงเทพฯ.
- เกษม จันทร์แก้ว. 2524. **วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น**. ครั้งที่ 10. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ถวิล ครุฑกุล. 2526. **การเป็นพิษของอาร์เซนิกต่อมันสำปะหลังเมื่อใส่โซเดียมอาร์ซีเนทลงไปใน
ดินมาบอบร้อนปนทราย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ทัศนีย์ อัดตะนันท์ และ และ จงรักษ์ จันทร์เจริญสุข. 2542. **แบบฝึกหัดและคู่มือปฏิบัติการการ
วิเคราะห์ดินและพืช**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
กรุงเทพฯ.
- ทวีสิทธิ์ อิศรเดช. 2536. **ปริมาณตะกั่วปรอท แคดเมียม และสารหนูในปุ๋ยหมักไฮเทคจากขยะ
ของเขตเทศบาลเมืองเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ธีระ รัฐถาวร. 2528. **หลักสูตรภาควิทยา**. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- ประชา เอมอร. 2534. **แนวนโยบายในการควบคุมสารพิษในชีวิตประจำวัน**. คณะกรรมการอาหาร
และยา กระทรวงสาธารณสุข, นนทบุรี.
- ปรีดา พากเพียร, ประพิศ แสงทอง และ พิชิต พงษ์สกุล. 2547. **การปนเปื้อนของโลหะหนักใน
ดินและพืชอาหารในประเทศไทย**. วาสารดินและปุ๋ย 26: 31-36.
- _____, อภิสิทธิ์ เอี่ยมหน่อ, ไสนซ์ เอ็กการ์ดท และ ธวัชชัย ฌ นคร. 2541. **โลหะหนัก
แหล่งที่มา ค่ามาตรฐานและการทำปฏิกิริยากับดิน**. วาสารดินและปุ๋ย 20 (2): 41-49.

เปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวต. 2529. แหล่งน้ำกับปัญหามลพิษ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

พรรณทิพย์ ดิยพันธ์. 2545. แคดเมียม (Cadmium). แหล่งที่มา:

http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=26, 25 กันยายน 2548.

พิชิต พงษ์สกุล และ สุรสิทธิ์ อรรถจารุสิทธิ์. 2543. การประเมินการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนักในดิน. วารสารดินและปุ๋ย 23 (1): 29-37.

พิมล เรียนวัฒนา และ ชัยวัฒน์ เจนวนิชย์. 2525. เคมีสถานะแวดล้อม. โอเดียนสโตร, กรุงเทพฯ.

_____ และ วิโรจน์ ปิยวัชพันธ์. 2527. การหาปริมาณรวมของปรอทในปลาน้ำจืด, ในเอกสารประกอบการสัมมนาเรื่องปัญหามลภาวะของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย. สถาบันวิจัยสถานะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

มนัสวงษ์ สวดไธ. 2546. การหาค่าปริมาณปรอทรวมและปริมาณปรอทอินทรีย์รวมในน้ำและดินตะกอนในอ่าวเพ จังหวัดระยอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ไมตรี สุทธจิตต์. 2531. สารพิษรอบตัวเรา. โรงพิมพ์ดาราคอมพิวเตอร์กราฟฟิค, เชียงใหม่.

ขงยุทธ โอสธสภ. 2528. หลักการผลิตและการใช้ปุ๋ย. คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ราชนนท์ ธีรพร. 2539. ข้าวโพด. ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วรกาย อุตสาห. 2542. ปริมาณธาตุอาหารและโลหะหนักในพืชที่ปลูกโดยใช้วัสดุปลูกผสมระหว่างตะกอนน้ำเสียและดินในท้องที่จังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรพจน์ รัมพนินิล. 2530. ปุ๋ยและการใช้ปุ๋ย. ยูไนเต็ทบุ๊กส์, กรุงเทพฯ.

ศิริพร พลายมูล. 2527. ผลกระทบของแคดเมียมในแอคติเวตเตดสลัดจ์ที่มีต่อกิจกรรมของ
แอมโมเนียไฟเออร์และข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศุภมาส พานิชศักดิ์พัฒนา. 2545. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมใจ กาญจนวงศ์. 2534. น้ำเสียและผลกระทบของน้ำเสียต่อสิ่งแวดล้อม, น. 1-1 – 1-12. ใน
เอกสารการอบรมทางวิชาการ เรื่อง การควบคุมน้ำเสียจากชุมชนและอุตสาหกรรม .
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

สิทธิชัย ดันธนะสฤษฎี. 2528. พืชวิทยาสิ่งแวดล้อม. โครงการสหวิทยาการบัณฑิตศึกษา
สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุธรรม เข้มนิยม และ งานพิศ เข้มนิยม. 2519. เอกสารเศรษฐฐณีวิทยา เล่มที่ 12. กองเศรษฐ
ฐณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพฯ.

อรรวรรณ ศิริรัตน์พิสัย. 2522. อิทธิพลของตะกั่วและแคดเมียมต่อการเจริญเติบโตและ
องค์ประกอบทางเคมีของพืชอาหารสัตว์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อำนวย อำเมือง. 2528. อิทธิพลของตะกั่วในแอคติเวตเตดสลัดจ์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ
แอมโมเนียมและซีโอดี และผลที่มีต่อการเจริญเติบโตของข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Ahlf, W. 1988. Correlations between chemical and biological valuation procedures for the
determination of heavy metal availability from soils, pp. 67-69. In K. Wolf, W.J.
vander Brink and F.J. Colon, eds. **Contaminated Soil**. Kluwer Academic Publ,
Dordrecht.

- Alloway, B.J. 1990. Cadmium, pp. 100-124. *In* B.J. Alloway, ed. **Heavy Metal in Soil.** John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Beavington, F. 1975. Heavy metals contamination of vegetables and soil in domestic gardens around a Smelting Conyslex. **Environ Pollut.** 9: 211-217.
- Bennett, B.C. 1982. The exposure commitment method with application to environmental mercury. **Environ. Monit. Assess.** 2: 085-093.
- Berman, E. 1980. **Toxic Metals and their Analysis.** Cambridge University Press, London.
- Bram, E. and W. Anthony. 1983. Cadmium and lead through and agricultural food chain.. **Sci. Total. Environ.** 28: 295-307.
- Bray, R.H. and N. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils.. **Soil Sci** 59: 39-45.
- Brooks, A.R. 1979. Pollution through trace elementals, pp. 429-476. *In* J.O.M. Bockris, ed. **Environmental Chemistry.** Plenum Press, New York.
- Chizhikov, D.M. 1966. **Cadmium.** Pregamon Press Inc, New York.
- Commission of the European Communities. 1973. **Air Lead Concentration in the European Community 1973.** Annual Report. Lexemberg.
- Committee on Biological Effects of Atmospheric Pollutant. 1972. **Lead : Airborne Lead in Perspective.** National Academy of Science, Washington D.C.
- Committee on Lead in the Human Environment. 1980. **Lead in the Human. Environment** National Academy of Science, Washington D.C.

- Cooper, G.P., J.B. Suszkiw and R.S. Manalis. 1984. Heavy Metal : effect on Synaptic Isanmission.. **Nurotoxico** 5: 247-266.
- Dong, A., G. Chesters and G.V. Simsiman. 1983. Metal composition of soil, Sediments and urban dust and Dirt samples from the Menomonee River watershed, Wisconsin, U.S.A.. **Water, Air, Soil Pollut** 22 (3): 257-275.
- Elinder, E.G. 1982. Cadmium and Health. A Survey Intern. **J. Environ Studies** 19: 187-193.
- Elkins, H.B. 1963. **The Chemistry of Industrial Toxicology**. 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc, New York.
- EPA. 1979. **Water related environment fate of 129 priority pollutions**. vol. 1. United State Environment Protection Agency, Washington, D.C.
- Ewing, B.B. and J.E. Pearson. 1974. **Lead in the Environment In Advance in Environmental Science and Technology**. vol. 3. Lloyd. A.C. (Associate ed.) A Wiley-Interscience. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- FAO/WHO. 1972. **Evaluation of certain food additives and contaminant Mercury, Lead and Cadmium**. Sixteenth Report of Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additive, New York.
- Fassett, R.H. 1980. Cadmium, pp. 22-29. In Waldon A, ed. **Metal in the Environment**. CRC Press Inc, Cleveland.
- Food and Environmental Hygiene Department. 2006. **Maximum permitted concentration of certain metals present in specified foods**. Hong Kong. Available Source: http://www.fehd.gov.hk/safefood/foodlaw_mc.html#mc_sch2, August 25, 2006.

Francis, B.M. 1994. **Toxic Substances in the Environment**. John Wiley & Sons, Inc, New York.

Francis, A.J. and C.J. Dodge. 1988. Anaerobic microbial dissolution of transition and heavy metal oxide. **Microbiolog** 54: 1009-1014.

Friberg, L.M. Piscator, G.F. Norberg and T. Kjellstorm. 1976. **Cadmium in the Environment**. Academic Press Inc, New York.

Gidding, J.C. and M.B. Monroe. 1972. **Our Chemical Environment**. Canfield Press, San Francisco.

Goldwater, J.L. and W. Stopford. 1977. **Mercury of the chemical environment**. Blakie & Sons Ltd, London.

Goodbold, D.L. and A. Huttermann. 1986. The Uptake and toxicity of mercury and lead to spruce (*Picea abies* karst) seedling. **Water, Air and Soil Pollution** 31: 509-515.

Hammond, B. and R.R. Beliles. 1980. **Metals in Casarett and Doll's Toxicology; The Basic Science of Poisons**. 2 nd ed. McMillan Publ. Co., Inc., New York.

Hannerz, L. 1969. Experimental Investigation on the Accumulation of Mercury in Water Organism. **Fish Board of Swed Ins Mar Res Rep**. 43 : 120-176.

Harrison, R.M. and D.D.H. Laxen. 1981. **Lead Pollution Cause and Control**. The University Press, Cambridge.

Hawley, G.G. 1977. **The Condensed Chemical Dictionary**. 9th ed., Van Nostrand Reinhold. Co., London.

Hirsch, D. and A. Banin. 1990. Cadmium speciation in soil solution. **J. Environ. Qual.** 19: 366-372.

Hoffman, D.J., B.A. Rattner, G.A. Burton, Jr. and J. Cairns, Jr. 1995. **Handbook of Ecotoxicology.** Lewis Publishers, Boca Raton.

Jackson, M.L. 1958. **Soil chemical analysis.** Practice-Hall Inc., Englewood Cliffs.

Jernelov, A. 1969. **Conversion of Mercury Compounds.** Current Research of Persistent Pesticides. Charles E Thomas Springfield, Illinois.

John, M.K. and C.V. Laerhoven. 1972. Lead uptake by lettuce and qots as affect by lime, nitrogen and sources of lead. **J. Environ. Qual.** 1: 169-171.

Longan, T.J. and R.E. Feltz. 1985. Plant uptake of cadmium from acid extracted anaerobically digested sewage. **J. Environ. Qual.** 14(4): 495-550.

MAFF. 1982. **Survey of Lead in Food.** Second Supplementary Report, Food Surveillance paper no. 10., HMSO, London.

Matsumura, F., Y. Gotoh and G.M. Boush. 1972. Factors influencing translocation and transformation of mercury in river sediment. **Bull. Environ. Con. And Tox.** 8(5): 267.

McNeely, R.N., V.P. Neimanis and R.S. Ayers. 1979. **Water Quality Sourcebook a Guide to water Quality Parameters Inland water Directorate.** Water Quality Branch, Ottawa, Canada.

Moore M.R., B.C. Campbell and A. Goldberg. 1977. Lead, pp. 64-72. In J. Leniham and W.W. Fletsher, eds. **The Chemical Environmental.** Blackie, London.

- Murphy, C.B., J. Stuart and J. Spiegel. 1982. Bioaccumulation and toxicity of heavy metals and related trace elements. **J. WPCF.** 54(6): 849-854.
- Nobbs, C.L. and D.W. Pearce. 1976. The Economics of Stock Pollutants; The Example of Cadmium. Intern. **J. Environ Studies** 8: 245-255.
- Parker, S.P. 1993. **Encyclopedia of Chemistry.** 2nd ed., McGraw-Hill Inc., U.S.A.
- Pendias, A.K. and H. Pendias. 1992. **Trace Elements in Soils and Plants.** CRC. Press, Boca Raton.
- Popovac, D., J. Grazeano, C. Seaman and B. Kaul. 1982. Elevated blood Lead in Population near a Lead Smelter in Kosovo Yugoslavia. **Arch Environ Health.** 73(1): 19-23.
- Puckett, K.J., E. Nieboer, M.J. Gorzinski and D.H.S. Richardson. 1973. The uptake of metal Ions by Lichens. **New Phytol.** 727: 329-342.
- Rains, D.W. 1975. Wildoat as an indicator of atmospheric Inputs of lead to a Range Land Ecosystem. **J. Environ. Qual.** 4: 532-536
- Rashid, M.A. and J.D. Leonard. 1973. Modifications in the solubility and Precipitation Behaviour of Various Metals as a Results of Their Interaction with Sedimantary Humic Acid. **Chem. Geol.** 11: 89-97
- Rayan, J.A. 1978. **Cadmium Utilization and Environmental Implication.** Paper presented at 1st Applied Research & Practice on Municiple & Industrial Conference. Madison, Ohio, United States of America.
- Reilly, C. 1980. **Metal Contamination of food.** Applied Science Publishers Ltd., London.

Sandstead, H.H., W.H. Allaway, R.G. Burau, W. Fulkerson, H.A. Laitinent, P.M. Newberne, J.O. Pierce and B.G. Wixon. 1974. Cadmium, zinc and lead, pp. 72-80. In Geochemistry and the Environment. vol. 1. **The Relation of Selected Trace Elements to Health and Disease**. Nation Academy of Science, Washington D.C.

Sheldon, R.P., M.A. Warner, M.E. Thompson and H.W. Peirce. 1953. Stratigraphic sections of the phosphoric formation in Idaho. **Survey. Cric.** 304: 1.

Shirley, R.L. 1978. **Water as a source of minerals**. อ้างโดย สายันท์ ทัดสี, สุวพงษ์ สวัสดิ์พาณิชย์, สุชาดา เพ็ญศรี, จันทนา สุขปรีดา, สุนน มาสุชน, สมศักดิ์ เจริญวัย, และ ธนัญชัยวรรณสุข. เอกสารสัมมนาวิชาการเรื่อง เทคโนโลยีการกำจัดขยะแบบประหยัดและการบำบัดน้ำเสียด้วยพืช โครงการวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมภาคฝักเบ๊อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ระหว่างวันที่ 25- 28 สิงหาคม 2542. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Singh, S.K. and V. Subramanian. 1984. Hydrous Fe and Mn Oxides Scavengers of Heavy Metals in Aquatic Environmental. **CRC** 14 (1) : 33-90.

Smith, W.H. 1975. **Lead Contamination of the Roadside Ecosystem**. The 68 the Annual Meeting of the Air Pollution Control Association, 15-20 June 1975. The Air Pollution Control Association, Boston.

Stewart J.W.B. and J.R. Bettany. 1982. **Methods of Soil analysis Part 2**. Chemical and Microbiological Properties Edition. Agronomy American Society of Agronomy, Inc. Publisher Madison, Wisconsin, USA

Stewart, J.W.B., J.R. Bettany and F.P.W. Winteringham. 1973. **Lead and derivitives, all as a group**. Joint FAO/IAFA Summary Report. Chemospheve. 2: 41

Suckcharoen, S. 1980. Mercury Contamination of Terrestrial Vegetation near a Caustic Soda Factory in Thailand. **Bull. Environm. Contam. Toxicol.** 24 : 463-466

- Taylor, R.M., R.M. McKenzie and K. Norrish. 1964. The mineralogy and chemistry of manganese in some Australian soils. Aust. **J. Soil Res.** 2: 235-248
- Top 20 Hazardous Substances. 1999. **อันตรายจากแคดเมียม**. แหล่งที่มา: <http://www.charpa.co.th/bulletin/cadmium.html>, 8 กันยายน 2548.
- Tornbene, J.G. and H.W. Edward. 1972. Microbial uptake of lead science. **Soil Sci.** 176: 1334-1335
- UNEP. 1980. **The State of the World Environment**. United Nations Environment Programme.
- USGS. 1970. **Mercury in the Environment**. Washington, D.C. : U.S. Geological Survey Professional Paper 713. United States Government Printing Office.
- Van der Zee, S.E.A.T.M., W.H. Van Riemsdijk and F.A.M. de Haan. 1988. Transport of heavy metal and phosphate in heterogeneous soils, pp. 23-31. In K. Wolf, W.J. van der Brink and F.J. Colon (eds.). **Contaminated Soil**. Kluwer Academic Publ, London.
- Wedepohl, K.H. 1956. Untersuchungen zue geochemie des bleis. **Geochem. Cosmochem. Acta.** 10: 69-148
- William, R.J.P. 1967. **Heavy Metals in biological systems**. Endeavor 26: 96-100.
- Williams, M.K., E. King and J. Walford. 1975. An investigation of lead absorption in an electric accumulator or factory with the use of personal samplers. **British J. of Industrial Medicine** 26: 202-205.
- Winteringham, P.P. 1972. **Introduction mercury contamination in man and his environment**. International Atomic Energy Agency, Vienna.

World Health Organization Geneva. 1977. **Environmental Health Criteria 3. Lead.** Printed in United Kingdom.

Zimdahl, R.L. and R.K. Skogerboe. 1977. Heavy metals in soil. **Environ. Sci. Technol** 11: 1202-1207.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในแต่ละดำรับการทดลอง (มิลลิกรัม/กระถาง)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก		
	0	75	150
ใส่ครั้งเดียว	213.89	219.85	225.79
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	213.89	219.85	225.79

ตารางผนวกที่ 2 ปริมาณแคลเซียมทั้งหมดในแต่ละดำรับการทดลอง (มิลลิกรัม/กระถาง)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก		
	0	75	150
ใส่ครั้งเดียว	66.41	66.57	66.73
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	66.41	66.57	66.73

ตารางผนวกที่ 3 ปริมาณปรอททั้งหมดในแต่ละดำรับการทดลอง (มิลลิกรัม/กระถาง)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก		
	0	75	150
ใส่ครั้งเดียว	0.561	0.575	0.590
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	0.561	0.575	0.590

ตารางผนวกที่ 4 ปริมาณสารหนูทั้งหมดในแต่ละดำรับการทดลอง (มิลลิกรัม/กระถาง)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก		
	0	75	150
ใส่ครั้งเดียว	30.68	30.73	30.78
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	30.68	30.73	30.78

ตารางผนวกที่ 5 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของดินหลังปลูก

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	7.77	8.30	7.87	7.98
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	8.10	7.90	8.17	8.06
C-เฉลี่ย	7.93	8.10	8.02	8.02
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)	ns			
F-test เวลาการใส่ปุ๋ยเคมี (F)	ns			
C×F	ns			
CV(%)	4.61			

หมายเหตุ ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางผนวกที่ 6 ค่าการนำไฟฟ้าของดินหลังปลูก (dS m^{-1})

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	0.68	0.88	1.02	0.86
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	0.72	0.87	0.90	0.83
C-เฉลี่ย	0.70 C	0.87 B	0.96 A	0.84
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		**		
F-test เวลาการใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
C×F		ns		
CV(%)		6.40		

หมายเหตุ ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

 ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ 7 ความสูงของข้าวโพดหวานอายุ 20 วัน (เซนติเมตร)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	20.00	20.70	20.30	20.33
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	20.00	21.70	19.83	20.50
C-เฉลี่ย	20.00	21.17	20.08	20.42
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)	ns			
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)	ns			
F-test (C×F)	ns			
CV(%)	7.09			

หมายเหตุ ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางผนวกที่ 8 ความสูงของข้าวโพดหวานอายุ 40 วัน (เซนติเมตร)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	81.00	84.70	90.00	85.22
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	85.30	88.80	85.00	86.39
C-เฉลี่ย	83.17	86.75	87.50	85.81
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)	ns			
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)	ns			
F-test (C×F)	ns			
CV(%)	6.85			

หมายเหตุ ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางผนวกที่ 9 ความสูงของข้าวโพดหวานอายุ 60 วัน (เซนติเมตร)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	185.0	194.0	204.7	194.6
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	195.7	197.5	187	193.3
C-เฉลี่ย	190.3	195.7	195.8	193.9
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)	ns			
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)	ns			
F-test (C×F)	ns			
CV(%)	6.75			

หมายเหตุ ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางผนวกที่ 10 น้ำหนักสดของต้นข้าวโพดหวาน (กรัม/ต้น)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	349 Cb	439 Ba	539 Aa	442
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	448 Aa	468 Aa	452 Ab	456
C-เฉลี่ย	398 C	454 B	496 A	449
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)	**			
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)	ns			
F-test (C×F)	**			
CV(%)	5.80			

หมายเหตุ ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

 ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ 11 น้ำหนักสดของเมล็ดข้าวโพดหวาน (กรัม/ต้น)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	109	178	184	157
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	143	175	171	163
C-เฉลี่ย	126 B	177 A	178 A	156
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		*		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
F-test (C×F)		ns		
CV(%)		12.67		

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ 12 ปริมาณตะกั่วที่สะสมในดินของข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/ต้น)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	2,999 Cb	6,469 Ba	10,312 Aa	6,593
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	7,355 Aa	6,619 Aa	7,543 Ab	7,172
C-เฉลี่ย	5,177 C	6,544 B	8,927 A	6,883
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		**		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
F-test (C×F)		**		
CV(%)		11.74		

หมายเหตุ ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

 ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ 13 ปริมาณตะกั่วที่สะสมในเมล็ดของข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/เมล็ด)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	1,372 Ba	2,126 Aa	2,316 Aa	1,938
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	1,686 Ba	2,023 Aa	1,756 Bb	1,822
C-เฉลี่ย	1,529 B	2,075 A	2,036 A	1,880
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		**		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
F-test (C×F)		*		
CV(%)		9.56		

หมายเหตุ	*	=	มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
	**	=	มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
	ns	=	ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ 14 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในต้นของข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/ต้น)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	28.2 Bb	109.3 Aa	131.0 Aa	89.5
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	112.2 Aa	68.2 Bb	103.0 Aa	94.4
C-เฉลี่ย	70.2 B	88.7 B	117.0 A	92.0
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		*		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
F-test (C×F)		**		
CV(%)		18.41		

หมายเหตุ	*	=	มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
	**	=	มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
	ns	=	ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ 15 ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในเมล็ดของข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/เมล็ด)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	10.37 Aa	14.32 Aa	11.26 Ab	11.98
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	15.04 Ba	1.65 Cb	22.44 Aa	13.04
C-เฉลี่ย	12.70 B	7.99 C	16.85 A	12.51
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		**		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
F-test (C×F)		**		
CV(%)		20.06		

หมายเหตุ ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

 ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ 16 ปริมาณปรอทที่สะสมในต้นของข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/ต้น)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	17.4 Ba	19.3 Bb	35.9 Aa	24.2
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	17.0 Ca	27.8 Aa	22.6 Ba	22.5
C-เฉลี่ย	17.2 C	23.5 B	29.3 A	23.3
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		*		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
F-test (C×F)		*		
CV(%)		18.16		

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ 17 ปริมาณโปรทที่สะสมในเมล็ดของข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/เมล็ด)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	2.59 Ba	4.45 Aa	3.40 Bb	3.48
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	2.16 Ca	3.36 Bb	4.56 Aa	3.36
C-เฉลี่ย	2.37 B	3.91 A	3.98 A	3.42
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		**		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		ns		
F-test (C×F)		*		
CV(%)		13.28		

หมายเหตุ	*	=	มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
	**	=	มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%
	ns	=	ไม่แตกต่างทางสถิติ

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ 18 ปริมาณสารหนูที่สะสมในต้นของข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/ต้น)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	14.7 Bb	22.3 Bb	44.0 Aa	27.0 b
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	25.5 Ba	49.6 Aa	55.3 Aa	43.5 a
C-เฉลี่ย	20.1 C	36.0 B	49.6 A	35.2
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		**		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		**		
F-test (C×F)		*		
CV(%)		11.66		

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ 19 ปริมาณสารหนูที่สะสมในเมล็ดของข้าวโพดหวาน (ไมโครกรัม/เมล็ด)

การใส่ปุ๋ยเคมี	อัตราปุ๋ยหมัก			F-เฉลี่ย
	0	75	150	
ใส่ครั้งเดียว	4.35 Ba	10.83 Aa	9.16 Ab	8.11 b
แบ่งใส่ 2 ครั้ง	5.25 Ca	11.76 Ba	18.23 Aa	11.75 a
C-เฉลี่ย	4.80 C	11.30 B	13.69 A	9.93
F-test อัตราปุ๋ยหมัก (C)		**		
F-test การใส่ปุ๋ยเคมี (F)		**		
F-test (C×F)		*		
CV(%)		16.55		

หมายเหตุ * = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ในสดมภ์เดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวเล็กที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ในแถวเดียวกันตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรอังกฤษตัวใหญ่ที่เหมือนกันจะมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยวิธี DMRT

ตารางผนวกที่ 20 มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม

โลหะหนัก	ค่ามาตรฐาน (มก./กก.)
สารหนู	3.9
แคดเมียมและสารประกอบแคดเมียม	37
ตะกั่ว	400
ปรอทและสารประกอบปรอท	23

ที่มา : ดัดแปลงจากกรมควบคุมมลพิษ (2549)

ตารางผนวกที่ 21 ปริมาณโลหะหนักที่ยอมรับได้ในปุ๋ยหมัก

โลหะหนัก/สารพิษ	ปริมาณโลหะหนักที่ยอมรับได้ (mg/kg)
สารหนู (arsenic)	50
แคดเมียม (cadmium)	5
โครเมียม (chromium)	300
ทองแดง (copper)	500
ตะกั่ว (lead)	500
ปรอท (mercury)	2

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2544)

ตารางผนวกที่ 22 ค่าความเข้มข้นที่ยอมรับได้ (maximum permitted concentration) ของอาหารและ
ผลิตผลเกษตรบางชนิดของประเทศออสเตรเลีย

ชนิด	ค่าความเข้มข้นที่ยอมรับได้ (มก./กก.)			
	สารหนู	แคดเมียม	ตะกั่ว	ปรอท
อาหารเหลว	0.1	-	0.20	0.03
ผลไม้	1.0	0.1	0.1	0.03
ข้าว	-	0.1	0.2	-
ถั่วลิสง	-	0.05	0.2	-
พืชหัว	-	0.1	-	-
พืชผัก	1.0	0.1	0.1	0.03

ที่มา: พืชดและคณะ (2543)

ตารางผนวกที่ 23 ค่าความเข้มข้นที่ยอมรับได้ (maximum permitted concentration) ของอาหารใน
ฮ่องกง

โลหะหนัก	ชนิดอาหาร	ค่าความเข้มข้นที่ยอมรับได้ (มก./กก.)
สารหนู	อาหารแข็ง เช่น	1.4
	(I) ปลาและผลิตภัณฑ์จากปลา	
	(II) สัตว์น้ำชนิดมีเปลือกและผลิตภัณฑ์	
	อาหารเหลวทุกชนิด	0.14
แคดเมียม	ผักและธัญพืช	0.1
	ปลา, เนื้อปู, หอยนางรม, กุ้งนาง และกุ้งฝอย	2
	เนื้อสัตว์และสัตว์ปีก	0.1
ตะกั่ว	อาหารแข็งทุกชนิด	6
	อาหารเหลวทุกชนิด	1
ปรอท	อาหารแข็งทุกชนิด	0.5
	อาหารเหลวทุกชนิด	0.5

ที่มา: ดัดแปลงจาก Food and Environmental Hygiene Department of Hong Kong (2006)

ตารางผนวกที่ 24 ข้อจำกัดของสมบัติทางเคมีที่ใช้ประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน
(Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973)

1. ปฏิกริยาดิน (Soil reaction), pH (ดินต่อน้ำ = 1:1)

ระดับ (rating)		พิสัย (range)
กรดจัดมาก	Extremely acid	< 4.5
กรดจัดมาก	Very strong acid	4.5-5.0
กรดแก่	Strong acid	5.1-5.5
กรดปานกลาง	Moderately acid	5.6-6.0
กรดเล็กน้อย	Slightly acid	6.1-6.5
กลาง	Neutral	6.6-7.3
ด่างอ่อน	Mildly alkaline	7.4-7.8
ด่างปานกลาง	Moderately alkaline	7.9-8.4
ด่างแก่	Strongly alkaline	8.5-9.0
ด่างจัด	Extremely alkaline	> 9.0

2. อินทรีย์วัตถุ (Organic matter) (% organic carbon $\times$ 1.724)

ระดับ (rating)		พิสัย (range) (g kg^{-1})
ต่ำมาก	(VL)	< 0.5
ต่ำมาก	(L)	0.5-1.0
ค่อนข้างต่ำ	(ML)	1.0-1.5
ปานกลาง	(M)	1.5-2.5
ค่อนข้างสูง	(MH)	2.5-3.5
สูง	(H)	3.5-4.5
สูงมาก	(VH)	> 4.5

3. ปริมาณไนโตรเจนรวม (Total nitrogen)

ระดับ (rating)		พิสัย (range) (g kg ⁻¹)
ต่ำมาก	(VL)	< 0.25
ต่ำ	(L)	0.50-0.75
ปานกลาง	(M)	0.75-1.25
สูง	(H)	1.25-1.75
สูงมาก	(VH)	> 2.25

4. ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P) (Bray II)

ระดับ (rating)		พิสัย (range) (mg kg ⁻¹)
ต่ำมาก	(VL)	< 3
ต่ำ	(L)	3-6
ค่อนข้างต่ำ	(ML)	6-10
ปานกลาง	(M)	10-15
ค่อนข้างสูง	(MH)	15-25
สูง	(H)	25-45
สูงมาก	(VH)	> 45

5. ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Available K) (NH₄OAc)

ระดับ (rating)		พิสัย (range) (mg kg ⁻¹)
ต่ำมาก	(VL)	< 30
ต่ำ	(L)	30-60
ปานกลาง	(M)	60-90
สูง	(H)	90-120
สูงมาก	(VH)	> 120

6. ค่าที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable base) (NH_4OAc)

ระดับ (rating)	พิสัย (range) (cmol kg^{-1})		
	Exch. Ca	Exch. Mg	Exch. K
ต่ำมาก (VL)	< 2	< 0.3	< 0.2
ต่ำ (L)	2-5	0.3-1.0	0.2-0.3
ปานกลาง (M)	5-10	1.0-3.0	0.3-0.6
สูง (H)	10-20	3.0-8.0	0.6-1.2
สูงมาก (VH)	> 20	> 8.0	> 1.2

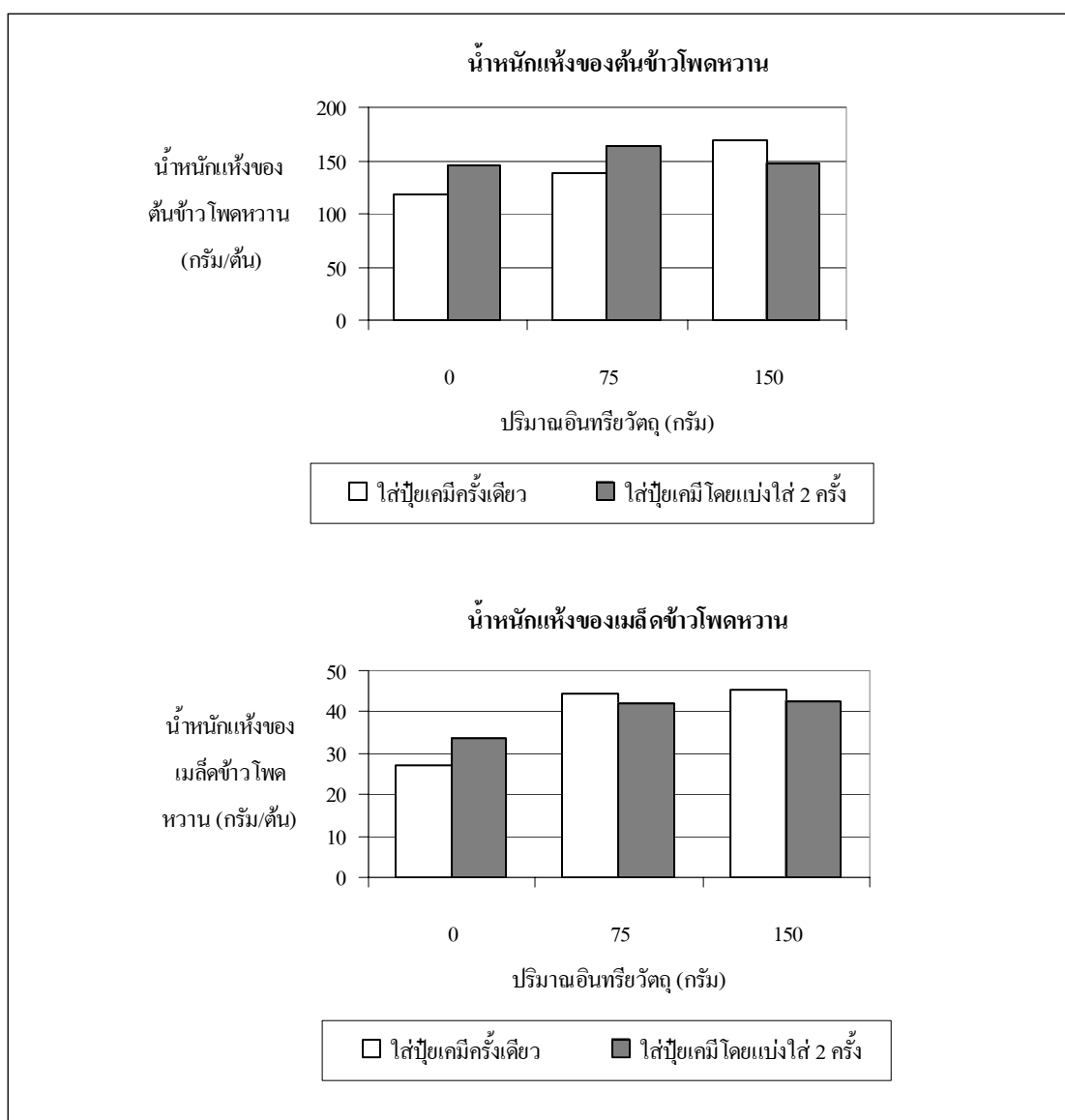
7. ระดับความเค็มของดิน

ระดับ (rating)	พิสัย (range)
ต่ำมาก (VL)	0-2
ต่ำ (L)	> 2-4
ปานกลาง (M)	> 4-8
สูง (H)	> 8-16
สูงมาก (VH)	> 16

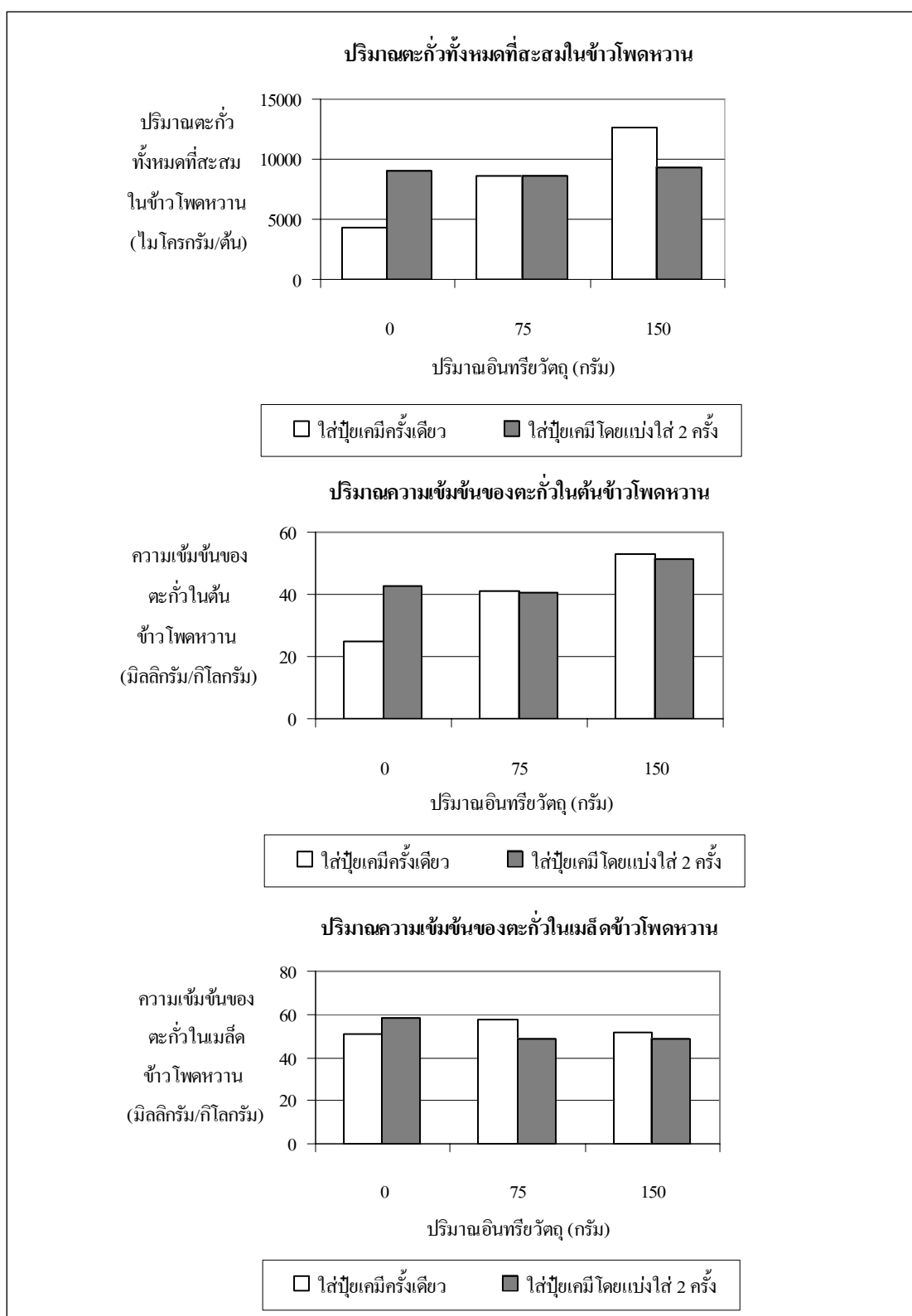
หมายเหตุ	VL = ต่ำมาก (Very low)
	V = ต่ำ (Low)
	ML = ค่อนข้างต่ำ (Moderately low)
	M = ปานกลาง (Moderately)
	MH = ค่อนข้างสูง (Moderately high)
	H = สูง (High)
	VH = สูงมาก (Very high)

ตารางผนวกที่ 25 แสดงการเปลี่ยน non SI unit เป็น SI unit

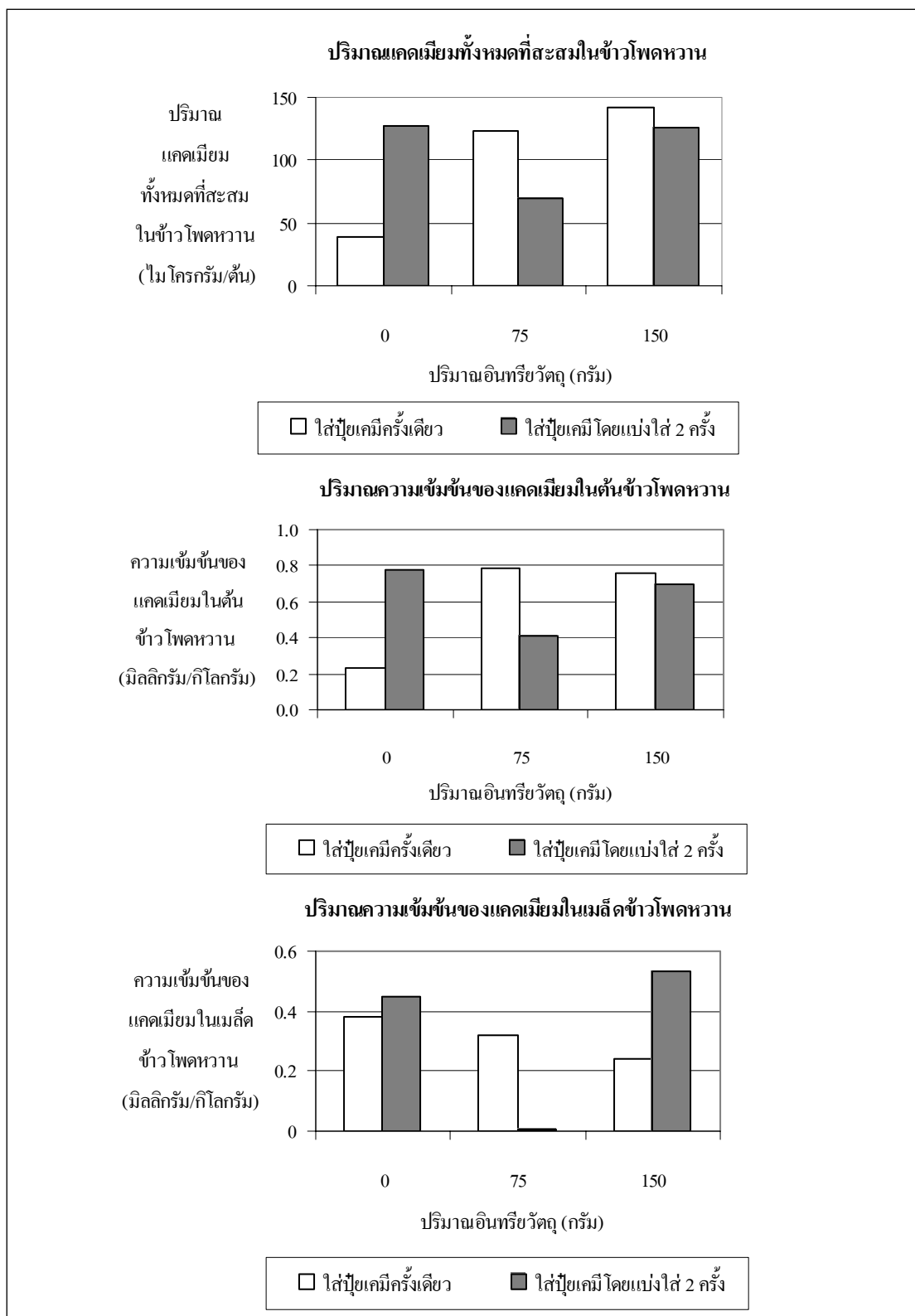
Quantity	SI unit	Conversion equation
Electrical conductivity	dS m^{-1}	$1 \text{ mS/cm} = \text{dS m}^{-1}$
		$1 \mu\text{S/cm} = 0.001 \text{ dS m}^{-1}$
Cation exchange capacity	cmol (+) kg^{-1}	$1 \text{ meq/100g} = \text{cmol (+) kg}^{-1}$
Anion exchange capacity	cmol (-) kg^{-1}	$1 \text{ meq/100g} = \text{cmol (-) kg}^{-1}$
Exchange cation	cmol (+) kg^{-1}	$1 \text{ meq/100g} = \text{cmol (+) kg}^{-1}$
Mass ratio	g / kg^{-1}	$1\% = 10 \text{ mg kg}^{-1}$
	mg kg^{-1}	$1 \text{ ppm} = 1 \text{ mg kg}^{-1}$
		$1 \text{ mg/100g} = 10 \text{ mg kg}^{-1}$
	$\mu\text{g kg}^{-1}$	$1 \text{ ppb} = 1 \mu\text{g kg}^{-1}$
	mg kg^{-1}	$1 \text{ ppt} = 1 \text{ ng kg}^{-1}$
Mass concentration	g L^{-1}	$1\% = 10 \text{ g L}^{-1}$
	mg L^{-1}	$1 \text{ ppm} = 1 \text{ mg L}^{-1}$
	$\mu\text{g L}^{-1}$	$1 \text{ ppb} = 1 \mu\text{g L}^{-1}$
Density	Mg m^{-3}	$1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ Mg m}^{-3}$
Specific surface	$\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$	$1 \text{ m}^2/\text{g} = 1000 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$
Pressure	kPa, Mpa	$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ Mpa}$
Radioactivity	Bq	$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
Rate, Yield	kg ha^{-1}	$1 \text{ kg/10 a} = 10 \text{ kg ha}^{-1}$
	Mg ha^{-1}	$1 \text{ t/10 a} = 10 \text{ Mg ha}^{-1}$



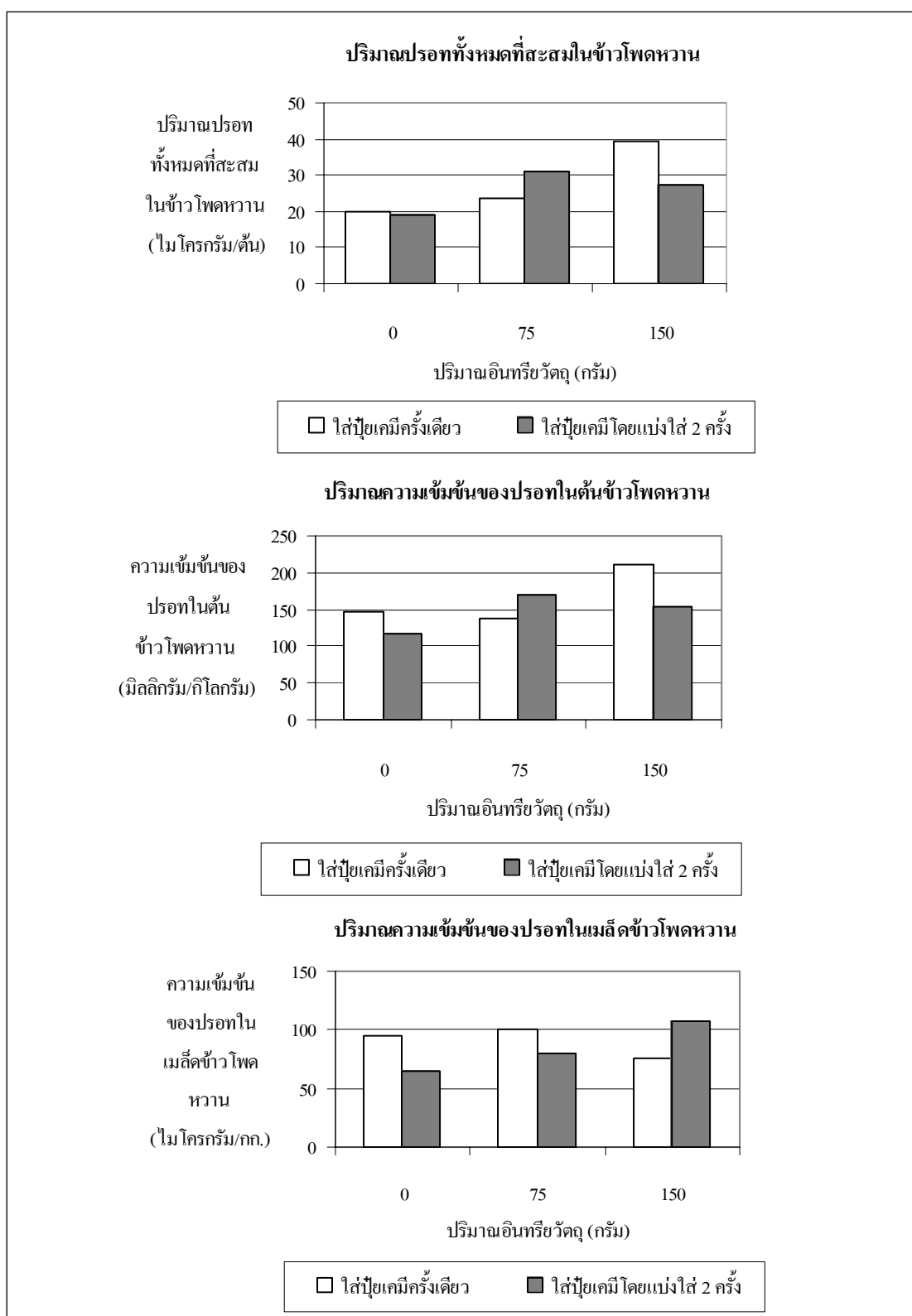
ภาพผนวกที่ 1 น้ำหนักแห้งของต้นข้าวโพดหวาน และน้ำหนักแห้งของเมล็ดข้าวโพดหวาน



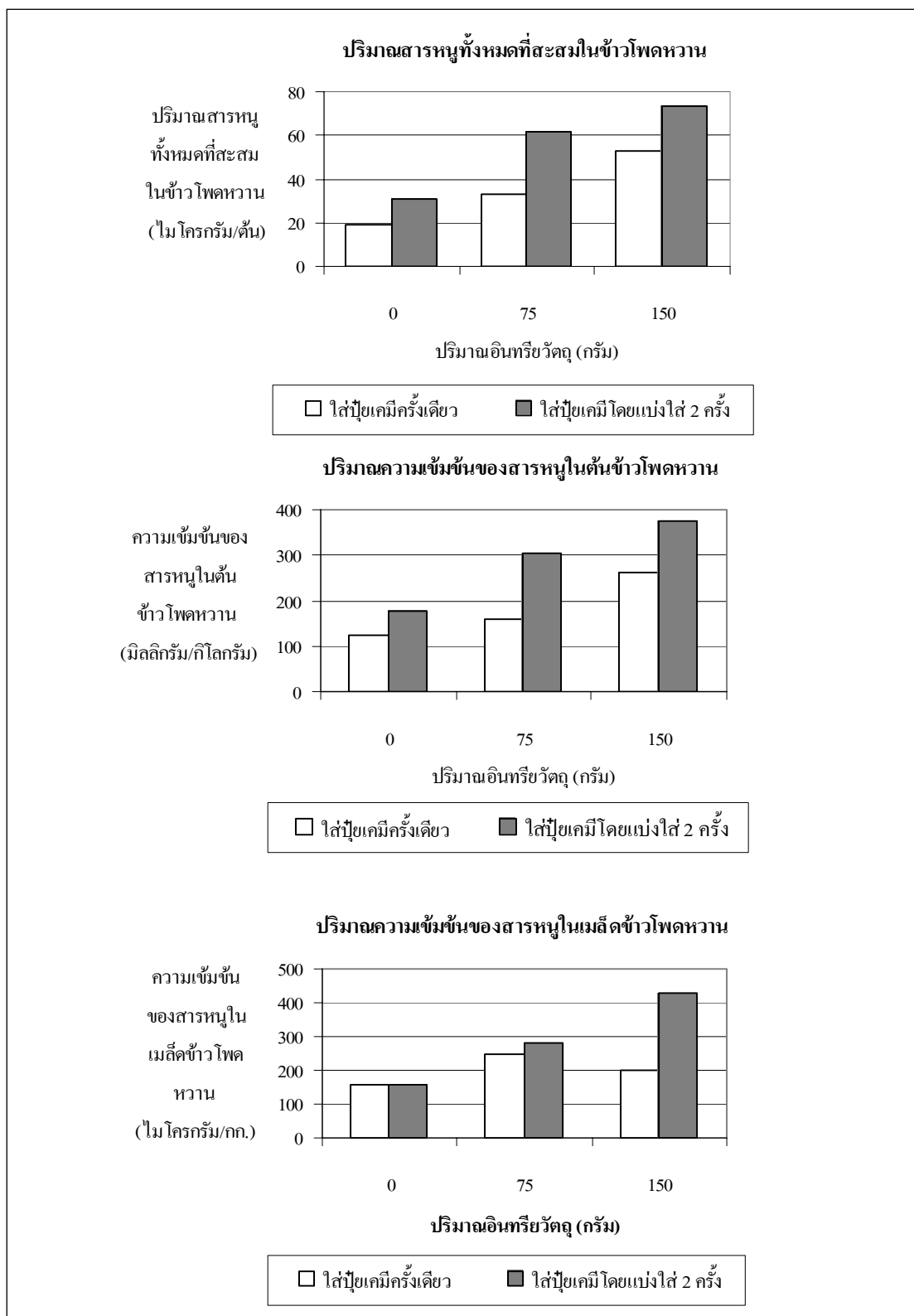
ภาพผนวกที่ 2 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่สะสม, ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในต้นและเมล็ดของข้าวโพดหวาน



ภาพผนวกที่ 3 ปริมาณแคดเมียมทั้งหมดที่สะสม, ปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในต้นและเมล็ดของข้าวโพดหวาน



ภาพผนวกที่ 4 ปริมาณปรอททั้งหมดที่สะสม, ปริมาณความเข้มข้นของปรอทในต้นและเมล็ดของข้าวโพดหวาน



ภาพผนวกที่ 5 ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่สะสม, ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในต้นและเมล็ดของข้าวโพดหวาน

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวปิยะพร วันสม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 28 ตุลาคม 2525
สถานที่เกิด	จังหวัดตรัง
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เคมีการเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-