



วิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์โลหะหนักในหญ้าแฝกที่ปลูกในดินเหมืองแร่สังกะสี
โดยเทคนิคทางนิวเคลียร์

**Analysis of Heavy Metals in Vetiver Grass Grown in Zinc Mine Area
by Using Nuclear Technique**

นางสาวสิริกร อนันต์เต่า

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

ปริญญา

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การวิเคราะห์โลหะหนักในหญ้าแฝกที่ปลูกในดินเหมืองแร่สังกะสี โดยเทคนิคทางนิวเคลียร์

Analysis of Heavy Metals in Vetiver Grass Grown in Zinc Mine Area by Using Nuclear
Technique

นามผู้วิจัย นางสาวสิริกร อนันต์คำ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รศ.ศาสตราจารย์นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ, วท.ค.)

กรรมการ

(อาจารย์สิรินาฏ เล่าหะโรจนพันธ์, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์พิชิต พงษ์สกุล, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์วันวิสา สดประเสริฐ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อางคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 21 เดือน พ. ค. พ.ศ. 2550

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์โลหะหนักในหญ้าแฝกที่ปลูกในดินเหมืองแร่สังกะสี โดยเทคนิคทางนิวเคลียร์

Analysis of Heavy Metals in Vetiver Grass Grown in Zinc Mine Area

by Using Nuclear Technique

โดย

นางสาวสิริกร อนันต์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

พ.ศ. 2550

สิริกร อนันต์ 2550: การวิเคราะห์โลหะหนักในหญ้าแฝกที่ปลูกในดินเหมืองแร่สังกะสี
โดยเทคนิคทางนิวเคลียร์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)
สาขารังสีประยุกต์และไอโซโทป ภาควิหารังสีประยุกต์และไอโซโทป
ประธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์นวนฉวี รุ่งธนเกียรติ, วท.ค. 104 หน้า

ได้ศึกษาอิทธิพลของปุ๋ยหมักต่อการเจริญเติบโตและการดูดซับโลหะหนักของแฝก 4
แหล่งพันธุ์ ที่ปลูกในดินเหมืองแร่สังกะสี โดยทำการทดลองใน 2 พื้นที่ของเหมืองแร่สังกะสี
บริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก พื้นที่ทดลองที่ 1 มีลักษณะลาด
ชัน และพื้นที่ทดลองที่ 2 มีลักษณะเป็นพื้นราบ ใช้แผนการทดลองแบบ Split plot design in CRD
ผลการทดลอง พบว่า การทดลองในพื้นที่ทั้ง 2 ให้ผลที่สอดคล้องกัน แฝกสามารถเจริญเติบโตได้
ในดินเหมืองแร่สังกะสี โดยแฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีความสูงและน้ำหนักแห้งสูงสุด
สามารถดูดซึมไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และ โพแทสเซียมได้สูงสุด เท่ากับ 2,897, 545 และ 2,355
กรัมต่อไร่ ตามลำดับ ในพื้นที่ลาดชัน และ 5,273, 494 และ 5,787 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ ในพื้นที่
ราบ สามารถดูดซึมสังกะสี แคดเมียมและเหล็ก ไว้ในต้นได้สูงสุด เท่ากับ 13.3, 0.4 และ 63.7 กรัม
ต่อไร่ ตามลำดับ ในพื้นที่ลาดชัน และ 29.2, 0.7 และ 99.7 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ ในพื้นที่ราบ แฝก
ที่ได้รับปุ๋ยหมักมีความสูง น้ำหนักแห้ง ปริมาณธาตุอาหารพืช และโลหะหนักในต้นแฝกสูงสุด
และสูงกว่าแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก โดยแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 และ 4 ตันต่อไร่ ให้ผลไม่
แตกต่างกันทางสถิติ ดังนั้น ในทางปฏิบัติของการปลูกแฝกในดินเหมืองแร่สังกะสี สามารถใส่ปุ๋ย
หมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ เพื่อช่วยเพิ่มอินทรีย์วัตถุในดิน และส่งเสริมการเจริญเติบโตของแฝกได้

เพื่อลดอิทธิพลของเมทริกซ์ โดยการหดยดสารละลายที่ได้จากการย่อยตัวอย่างดินและพืช
0.5 มิลลิกรัม ลงบนกระดาษกรอง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีและเหล็กด้วยวิธี XRF นั้น แสดงให้
เห็นว่า วิธี XRF ให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับวิธี AAS โดยผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของ
สังกะสีใกล้เคียงกับวิธี AAS มากกว่าผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็ก สมควรมีการศึกษา
เทคนิคการเตรียมตัวอย่าง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ ในดินและพืชด้วยวิธี
XRF ได้ถูกต้องแม่นยำต่อไป

สิริกร อนันต์

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่อประธานกรรมการ

8 / 5 / 50

Sirikorn Anantao 2007: Analysis of Heavy Metals in Vetiver Grass Grown in Zinc Mine Area by Using Nuclear Technique. Master of Science (Applied Radiation and Isotopes), Major Field: Applied Radiation and Isotopes, Department of Applied Radiation and Isotopes. Thesis Advisor: Associate Professor Nualchavee Roongtanakiat, Ph.D. 104 pages.

The effect of compost on growth and heavy metal uptake of four vetiver ecotypes planted in zinc mine soil was investigated. The experiment was conducted at two sites located on the Phadang Industry Company in Mae Sot district of Tak province. The first site was on sloping area and the second site was on plain area. The split plot design in CRD was used for both sites. The results showed that the four vetiver ecotypes grew well on the zinc mine soil. The Kamphaeng Phet-2 ecotype, planted at both sites, had the best plant growth and its shoot uptakes of N, P and K were 2,897, 545 and 2,355 g/rai, respectively in the sloping area while they were 5,273, 494 and 5,787 g/rai, respectively in the plain area. Kamphaeng Phet-2 accumulated Zn, Cd and Fe in the shoot up to 13.3, 0.4 and 63.7 g/rai, respectively in the sloping area and 29.2, 0.7 and 99.7 g/rai, respectively in the plain area. The compost applied to the vetiver at the rates 4 and 8 tons/rai resulted in better plant growth and heavy metal uptakes, comparing to those in the without compost application. However, the two mentioned different rates of compost yielded no significant in the vetiver growth and heavy metal uptakes. Therefore, compost application at the 4 kg/rai was economically recommended in using vetiver for heavy metal removal from the zinc mine soil.

For matrix effect elimination, filter papers with 0.5 ml of digested soil and plant solution were used for Zn and Fe analysis by the XRF technique. It showed that the XRF technique gave a good result when compared to the AAS technique in which the data of Zn concentration was more reliable than that of Fe concentration. The method of sample preparation for XRF technique should be further studied for result accuracy of low concentration elements in soil and plant.

Sirikorn Anantao

Student's signature

N. Roongtanakiat 8 ' 5 ' 07

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ ประธานที่
กรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้คำปรึกษา
แนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังปลูกฝังให้ความรู้และข้อคิดต่าง ๆ ใน
การทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้แก่ข้าพเจ้า ขอกราบขอบพระคุณ ดร. สิรินาฏ เลหาะโรจนพันธ์
กรรมการวิชาเอก ดร. พิชิต พงษ์สกุล กรรมการวิชาการ และอาจารย์ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณา
ให้คำปรึกษาแนะนำในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัทผาแดงอินดัสทรี ที่อนุเคราะห์พื้นที่ในการทำวิจัย ขอขอบคุณ
คุณชัยวัฒน์ เสดิมรอด คุณพิเชษฐ์ คุณอรรถวุฒิ พี่ ๆ เจ้าหน้าที่และพนักงานเหมืองแร่ผาแดงทุกคน
ที่ช่วยเหลือ และให้ความสะดวกในการไปทำวิจัยทุกครั้ง ขอขอบคุณสถานีพัฒนาที่ดินจังหวัด
กำแพงเพชร ตาก นครสวรรค์ นนทบุรี และประจวบคีรีขันธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์กล้าหญ้าแฝกใน
การทำวิจัย ขอขอบพระคุณอาจารย์ประพิศ แสงทอง อาจารย์สุรสิทธิ์
อรรถจารุสิทธิ์ อาจารย์ณฤพวัจก์ เงินจิตร และคุณสมบุญ ที่กรุณาให้ความกระจ่างในการ
ปฏิบัติงานในห้องทดลอง ขอขอบคุณ พี่ทิพย์ พี่ตะ พี่วินัย พี่ริน พี่นันท์ พี่แป้น พี่สี พี่ฉลอง พี่รส
ป้านันท์ น้องเอกและลุงทิน ที่คอยให้กำลังใจ และกำลังกายช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้
ด้วยดี และขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ได้มอบทุนวิจัยอุดหนุนและ
ส่งเสริมวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท-เอก

ขอขอบคุณพี่พริ้ง พี่โน้ พี่หญิง น้องปุ๋ย น้องแจ น้องหอม น้องแม็ค น้องเก่ง น้องเอกนิดา
และไหม เพื่อนร่วมรุ่น ที่คอยให้กำลังใจ กำลังใจช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี
ท้ายที่สุดข้าพเจ้ากราบขอบพระคุณกำลังใจที่ได้รับจาก คุณเดือนเพ็ญ คุณประทุม
ผู้เป็นมารดา ผู้ส่งเสริมให้ลูกได้รับการศึกษาจนถึงระดับมหาบัณฑิต คอยให้กำลังใจ และทุนทรัพย์
ตลอดการศึกษา และขอบคุณแรงใจที่ส่งมาจากคุณพ่อ คุณยาย คุณลุง คุณป้า พี่ น้อง และหลาน ที่
เป็นส่วนสำคัญในการช่วยให้วิทยานิพนธ์สำเร็จด้วยดี

ศิริกร อนันเตา

พฤษภาคม 2550

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
แฟก	5
แฟกกับโลหะหนัก	7
ปุ๋ยหมัก	12
การวิเคราะห์โลหะหนัก	14
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	29
ผลและวิจารณ์	35
ผลการทดลองในแปลงทดลองที่ 1	39
ผลการทดลองในแปลงทดลองที่ 2	54
การเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีอะตอมมิก	
แอบซอร์พชันสเปกโทสโกปีกับวิธีการวาวรังสีเอกซ์	71
สรุปและข้อเสนอแนะ	89
สรุป	89
ข้อเสนอแนะ	90
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	91
ภาคผนวก	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 สมบัติทางเคมี ความเข้มข้นของธาตุอาหารพืช และโลหะหนักของดินเหมืองแร่ สังกะสี บริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ที่ทดลองปลูกแฟก	36
2 ความสูงของแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 30, 60, 90 และ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 1	41
3 การแตกกอของแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อ ไร่ ที่ 30, 60, 90 และ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 1	42
4 น้ำหนักแห้งของต้นแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อ ไร่ ที่ 120 วันหลังปลูกในแปลงทดลองที่ 1	44
5 ความเข้มข้นของธาตุอาหารพืช (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม) ใน แฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และ สุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูกใน แปลงทดลองที่ 1	46
6 ปริมาณของธาตุอาหารพืช (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม) ในแฟก แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และ สุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูกใน แปลงทดลองที่ 1	50
7 ความเข้มข้นของโลหะหนัก (Zn, Cd และ Fe) ในดินแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมัก อัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 1	52

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
8	ปริมาณของโลหะหนัก (Zn, Cd และ Fe) ในดินแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 1	53
9	ความสูงของแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 30, 60, 90 และ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 2	56
10	การแตกกอของแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 30, 60, 90 และ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 2	57
11	น้ำหนักแห้งของดินแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 2	59
12	ความเข้มข้นของธาตุอาหารพืช (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม) ในแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูกในแปลงทดลองที่ 2	61
13	ปริมาณของธาตุอาหารพืช (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม) ในแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูกในแปลงทดลองที่ 2	63
14	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (Zn, Cd และ Fe) ในดินแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 2	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
15	ปริมาณของโลหะหนัก (Zn, Cd และ Fe) ในดินแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 2	70
16	ความเข้มข้นของสังกะสี (Zn) และเหล็ก (Fe) ในดินของแปลงทดลองที่ 1 เมื่อวิเคราะห์โดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) กับวิธีการวาวรังสีเอกซ์ (XRF)	79
17	ความเข้มข้นของสังกะสี (Zn) และเหล็ก (Fe) ในดินของแปลงทดลองที่ 2 เมื่อวิเคราะห์โดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) กับวิธีการวาวรังสีเอกซ์ (XRF)	80
18	ความเข้มข้นของสังกะสี (Zn) ในดินแฟกของแปลงทดลองที่ 1 เมื่อวิเคราะห์โดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) กับวิธีการวาวรังสีเอกซ์ (XRF)	85
19	ความเข้มข้นของเหล็ก (Fe) ในดินแฟกของแปลงทดลองที่ 1 เมื่อวิเคราะห์โดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) กับวิธีการวาวรังสีเอกซ์ (XRF)	86
20	ความเข้มข้นของสังกะสี (Zn) ในดินแฟกของแปลงทดลองที่ 2 เมื่อวิเคราะห์โดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) กับวิธีการวาวรังสีเอกซ์ (XRF)	87
21	ความเข้มข้นของเหล็ก (Fe) ในดินแฟกของแปลงทดลองที่ 2 เมื่อวิเคราะห์โดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) กับวิธีการวาวรังสีเอกซ์ (XRF)	88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
1 พืชของดิน(Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973)	102
2 อินทรีย์วัตถุในดิน (Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973)	102
3 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (Tatal N) (Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973)	103
4 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P) (Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973)	103
5 ปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ (Extractable K) (Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973)	104

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การเกิดรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง หรือรังสีเอกซ์แบบเบรมส์ตราลุง (Bremsstrahlung)	15
2 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-ray)	16
3 สเปกตรัมของรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องจากเบรมส์ตราลุง และสเปกตรัมเชิงเส้นจากรังสีเอกซ์เฉพาะตัว ที่ใช้เป่าเป็น โมลิบดีนัม	17
4 ระบบการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน	18
5 ระบบการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น	19
6 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน บริษัท Oxgord รุ่น ED 2000	20
7 หลักการทำงานของเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	25
8 ลักษณะของ HCL	26
9 โครงสร้างของเปลวไฟ	27
10 กระบวนการทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระด้วยเปลวไฟ	28
11 พื้นที่ปลูกแฟกในแปลงทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นพื้นที่ลาดชัน	30
12 พื้นที่ปลูกแฟกในแปลงทดลองที่ 2 ซึ่งเป็นพื้นที่ราบ	31
13 สเปกตรัมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในดินที่ปลูกแฟกในแปลงทดลองที่ 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์	37
14 สเปกตรัมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในดินที่ปลูกแฟกในแปลงทดลองที่ 2 ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์	38
15 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ดิน โดยวิธีอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโตรสโกปี	73
16 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ดิน โดยวิธีการวาวรังสีเอกซ์	74
17 สเปกตรัมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในกระดวยกรองเป่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์	75
18 สเปกตรัมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างดินทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	สเปกตรัมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างผงที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์	77
20	กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ดิน โดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี	82
21	กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ดิน โดยวิธีการวาวรังสีเอกซ์	83

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

K	=	แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร 2
N	=	แหล่งพันธุ์นครสวรรค์
P	=	แหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์
S	=	แหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี
AAS	=	Atomic absorption spectroscopy
Cd	=	Cadmium
CRD	=	Completely randomized design
cps	=	Count per second
DMRT	=	Duncan's multiple range test
EC	=	Electric capacity
Fe	=	Iron
mg	=	milligram
ml	=	milliliter
OM	=	Organic matter
ppm	=	Part per million
XRF	=	X-ray fluorescence
Zn	=	Zinc

การวิเคราะห์โลหะหนักในหญ้าแฝกที่ปลูกในดินเหมืองแร่สังกะสี โดยเทคนิคทางนิวเคลียร์

Analysis of Heavy Metals in Vetiver Grass Grown in Zinc Mine Area by Using Nuclear Technique

คำนำ

ดินเป็นทรัพยากรพื้นฐานในการดำรงชีวิตของมนุษย์ โดยเป็นแหล่งปัจจัยทั้ง 4 ของมนุษย์ ได้แก่ อาหาร เครื่องนุ่งห่ม ที่อยู่อาศัย และยารักษาโรค ทรัพยากรดินเป็นทรัพยากรที่มีอยู่จำกัดไม่สามารถทำให้เพิ่มขึ้นมาได้ ในขณะที่จำนวนประชากรเพิ่มขึ้นและมีการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว กิจกรรมของมนุษย์ เช่น การทิ้งขยะจากบ้านเรือน การบุกรุกพื้นที่ป่าไม้ การเกษตร และอุตสาหกรรม กิจกรรมเหล่านี้ทำให้ดินเกิดมลพิษ สภาพของดินเสื่อมโทรมลงมาก เกิดผลกระทบในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต

กิจกรรมทางเกษตรและอุตสาหกรรมเป็นสาเหตุให้เกิดมลพิษในดิน จากการทิ้งของเสียและสารพิษต่าง ๆ ลงดินแล้วตกค้างสะสมอยู่ในดิน เช่น สารฆ่าแมลง และสารเคมีกำจัดศัตรูพืช ก่อให้เกิดมลพิษในดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มลพิษในดินจากโลหะหนัก เช่น สังกะสี ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว และโครเมียม ซึ่งปะปนมากับของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทโรงชุบหรือเคลือบโลหะ ผลิตภัณฑ์ ทำพลาสติก ทำกระดาษ ผลิตภัณฑ์ และจากการทำเหมืองแร่ (สุริยา และคณะ, 2544) หนึ่งในอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดมลพิษเนื่องจากโลหะหนักก็คือ การทำเหมืองแร่ ดินที่ผ่านการทำเหมืองแร่แล้วปล่อยเป็นที่รกร้าง ไม่ก่อประโยชน์ จากการสำรวจพบว่ามีเนื้อที่ส่วนมากอยู่ทางภาคใต้ มีพื้นที่ประมาณ 200,000 ไร่ หรือ 0.06% ของพื้นที่ประเทศไทย (กรมพัฒนาที่ดิน, 2543) ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจาก การทำเหมืองแร่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสภาพผิวดิน เช่น มีการโค่นต้นไม้ ขุดหรือเจาะหน้าดินเพื่อนำแร่มาล้าง ซึ่งถ้าไม่มีการจัดการที่ดีจะทำให้เกิดการปนเปื้อนโลหะหนัก เช่น สังกะสี แคดเมียม สารหนู และปรอท ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากโลหะหนักบางส่วนละลายด้วยยาก มีการสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิต และถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหาร โดยปกติโลหะหนักจะเป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตถ้าได้รับในปริมาณมาก

ผลกระทบมักเกิดกับระบบประสาท ระบบกล้ามเนื้อ และ ระบบทางเดินหายใจ (สำนักนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม, 2543, 2545)

การบำบัดโลหะหนักที่เกิดจากการทำเหมืองแร่สามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีการหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาได้ระยะยาวก็คือ การปลูกแฝกเพื่อดูดซับโลหะหนัก เนื่องจากแฝกมีความทนต่อสภาพแวดล้อมที่โลหะหนักมีความเป็นพิษสูง เช่น สังกะสี ทองแดง สารหนู ตะกั่ว และปรอท (Truong and Baker, 1998) และสามารถนำมาใช้ในการฟื้นฟูสภาพดินเหมืองแร่ ป้องกันการแพร่และสะสมของโลหะหนักในดินได้ (Shu *et al.*, 2002)

ในประเทศไทย Roongtanakiat and Chairaj (2001) ทำการทดลองปลูกแฝกในกระถางที่มีดินปนเปื้อนเมงกานีส สังกะสี ทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว พบว่า แฝกสามารถดูดซับโลหะหนักเหล่านี้ได้ โดยปริมาณโลหะหนักที่สะสมในรากเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนวันเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณโลหะหนักที่สะสมในส่วนของลำต้นลดลง เมื่อจำนวนวันเพิ่มขึ้น ส่วนอนุรักษ์ (2544) ได้ทดลองปลูกแฝกในกระถาง โดยมีหางแร่ตะกั่วและหางแร่สังกะสีเป็นวัสดุปลูก พบว่า การเจริญเติบโตของแฝกที่ปลูกในดินหางแร่ตะกั่วทุกความเข้มข้นที่มีการใส่ปุ๋ย มีการเจริญเติบโตดีกว่าแฝกที่ปลูกในดินที่ไม่ใส่ปุ๋ย อย่างไรก็ตามการศึกษาที่ผ่านมาเป็นการทดลองในกระถาง ซึ่งยังไม่มี การนำไปปฏิบัติจริงในพื้นที่บริเวณเหมืองแร่ ดังนั้นจึงควรมีการนำแฝกไปปลูกในพื้นที่เหมืองแร่จริง เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตของแฝกแหล่งพันธุ์ต่าง ๆ และอิทธิพลของแหล่งพันธุ์ต่อการดูดซับโลหะหนักในดินเหมืองแร่ เพื่อสามารถเลือกใช้แหล่งพันธุ์แฝกที่เหมาะสม ไปปลูกในพื้นที่จริงได้

ในการวิจัยครั้งนี้ มุ่งเน้นศึกษาแหล่งพันธุ์แฝก และอิทธิพลของปุ๋ยหมักต่อการเจริญเติบโต และการดูดซับโลหะหนักของแฝกแหล่งพันธุ์ต่าง ๆ ที่ปลูกในพื้นที่เหมืองแร่สังกะสี บริษัทผาแดง อินคัสทรี อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก เนื่องจากปัจจุบัน สังกะสีเป็นโลหะที่มนุษย์ได้นำมาใช้อย่างกว้างขวางในการดำรงชีวิต เช่น การผลิตแผ่นเหล็กชุบสังกะสี ชิ้นส่วนยานพาหนะ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (กรมทรัพยากรธรณี, 2542) สังกะสีจึงเป็นวัตถุอันตราย สำหรับอุตสาหกรรม อันเป็นพื้นฐานการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ อีกทั้งยังเป็นทรัพยากรที่เมื่อนำมาใช้แล้ว ไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ ดังนั้น จึงต้องพยายามพัฒนาและจัดการทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ให้มีการผลิตแร่แบบยั่งยืน เกิดประโยชน์สูงสุด และมีผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักดินและพืชนั้น มีหลายวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น การวาวรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS) และการกระตุ้นด้วยนิวตรอน (Neutron Activation Analysis, NAA) งานวิจัยในครั้งนี้ เลือกใช้ 2 วิธี เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนัก และนำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกัน เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักมีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น และเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์นำมาวิเคราะห์โลหะหนักได้อย่างเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตและการดูดซึมโลหะหนักของแฟกบางแหล่งพันธุ์ ที่ปลูกในดินเหมืองแร่สังกะสี
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปุ๋ยหมักที่มีต่อการเจริญเติบโตและการดูดซึมโลหะหนักของแฟกแหล่งพันธุ์ต่าง ๆ ที่ปลูกในดินเหมืองแร่สังกะสี
3. เพื่อศึกษาเทคนิคทางนิวเคลียร์ ในการวิเคราะห์โลหะหนักในดินและพืช

การตรวจเอกสาร

แฝก

แฝก เป็นพืชตระกูลหญ้า ที่ขึ้นเป็นกอ มีลักษณะเป็นพุ่ม กอแฝกจะมีขนาดใหญ่ โคนกอเบียดกันแน่น มีระบบรากสานกันแน่นหยั่งลึกแนวดิ่งลงในดิน ไม่แผ่ขนาน จึงช่วยยึดเหนี่ยวดิน ช่วยป้องกันการชะล้างหน้าดินและการพังทลายของดินได้เป็นอย่างดี (กรมพัฒนาที่ดิน, 2541ก)

แฝก มีการกระจายอยู่ทั่วไปหลายพื้นที่ สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพอากาศที่ร้อน แห้งแล้ง จนถึงสภาพอากาศที่เย็นจัด แฝกขึ้นอยู่ตามธรรมชาติทั่วทุกภาคจากที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึงที่ดอน และเทือกเขาสูง ขึ้นได้ดีในดินทุกชนิด เช่น ดินร่วนปนทราย ดินเหนียว และดินเค็ม ในประเทศไทย พบแฝก (*Vetiveria spp.*) เพียง 2 ชนิด คือ แฝกหอม (*Vetiveria zizanioides* Nash.) และแฝกดอน (*Vetiveria nemoralis* A. Camus.) กรมพัฒนาที่ดิน (2535, 2537, 2541ก) ได้สรุปข้อแตกต่างของแฝกหอมและแฝกดอนไว้ดังนี้

แฝกหอม หรือแฝกลุ่ม หรือแฝกบ้าน (*Vetiveria zizanioides* Nash.)

แฝกหอมขึ้นทั่วไปในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ และขึ้นได้ดีในที่ราบลุ่มและน้ำท่วมขัง มีการปรับตัวเข้ากับพื้นที่ได้ดี และเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว มีหลายแหล่งพันธุ์ เช่น แหล่งพันธุ์สงขลา สุราษฎร์ธานี และกำแพงเพชร 2 นอกจากนี้ยังมีการนำเข้าจากต่างประเทศ เช่น แหล่งพันธุ์ศรีลังกา อินเดีย

ลักษณะกอของแฝกหอม คือ เป็นพุ่ม ใบแฝกหอมยาวตั้งตรงขึ้นสูงประมาณ 150 – 200 เซนติเมตร และยาว 45 – 100 เซนติเมตร กว้าง 0.6 – 1.2 เซนติเมตร ใบแฝกสีเขียวเข้ม หลังใบโค้ง และท้องใบแฝกออกสีขาว มีรอยกั้นขวางในใบ ใบแฝกค่อนข้างเหนียว มีไขเคลือบมาก ทำให้ดูมัน ช่อดอกและดอกแฝกสูงประมาณ 150 – 250 เซนติเมตร ส่วนใหญ่มีสีม่วง รากแฝกสามารถหยั่งลึกได้ประมาณตั้งแต่ 100 – 300 เซนติเมตร และมีความหอม เนื่องจากมีน้ำมันหอมระเหย ซึ่งเป็นสารพวก Alkaloids (กรมพัฒนาที่ดิน, 2535, 2537, 2541ก)

แฝกดอน หรือแฝกป่า (*Vetiveria nemoralis* A. Camus.)

แฝกดอนหรือที่เรียกแฝกพื้นบ้าน พบขึ้นทั่วไปในที่ค่อนข้างแล้ง หรือ ดินที่มีการระบายน้ำได้ดีในทุกภาคของประเทศไทย โดยเฉพาะในป่าเต็งรัง แต่จะมีน้อยในภาคใต้ สามารถขึ้นได้ดีทั้งในที่แดดจัดและแดดปานกลาง มีหลายแหล่งพันธุ์ เช่น แหล่งพันธุ์นครสวรรค์ ประจวบคีรีขันธ์ และราชบุรี

ลักษณะกอของแฝกดอน คือ เป็นพุ่ม ใบยาว ปลายใบแผ่โค้งลงคล้ายกอละไคร้ ไม่ตั้งมาก เหมือนแฝกหอม สูงประมาณ 100- 150 เซนติเมตร ใบยาว 35-80 เซนติเมตร กว้าง 0.4-0.8 เซนติเมตร ใบสีเขียวสด ท้องใบสีเขียวกับด้านหลังใบแต่สีดกว่า แผ่นใบเมื่อส่องแดดไม่เห็นรอยกั้นในเนื้อใบ เนื้อใบหยาบ สากคาย มีไขเคลือบน้อย ทำให้ดูรึ้น ช่อดอกและดอกสูงประมาณ 100-150 เซนติเมตร มีได้หลายสี ตั้งแต่สีขาว ครีมน้ำตาล ถึงม่วง รากไม่มีความหอม มีรากสั้นกว่า แฝกลุ่ม โดยทั่วไปรากจะยังลึกประมาณ 80- 100 เซนติเมตร [สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (กปร.), 2545]

การใช้ประโยชน์จากแฝก

แฝก มีถิ่นกำเนิดตามพื้นที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง ริมหนอง บึงในป่าเขา แต่เมื่อนำพันธุ์ที่คัดเลือกแล้วไปปลูกในพื้นที่ต่าง ๆ ทั่วโลก ปรากฏว่า ขึ้นได้เกือบทุกสภาพพื้นที่ เช่น แฝก สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพภูมิประเทศเป็นที่ราบ ใกล้เคียงระดับน้ำทะเล ถึงพื้นที่ภูเขาสูงถึง 2,600 เมตร จากระดับน้ำทะเล ขึ้นได้ในพื้นที่ดินเปรี้ยว ดินด่าง ดินเค็ม ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ พื้นที่ปริมาณน้ำฝนน้อย 200 มิลลิเมตร ถึงพื้นที่ฝนตกชุก 3,900 มิลลิเมตร- 5,000 มิลลิเมตร และมีระบบรากที่ยังลึกไม่แพร่กระจาย รากแฝกสานกันแน่นเป็นตาข่าย สามารถกรองเศษพืช ตะกอนดิน ช่วยดูดซึมสารเคมี และสิ่งปฏิกูลต่าง ๆ ไม่ให้ไหลลงสู่แหล่งน้ำได้ ดังนั้น จึงมีการนำแฝกมาใช้ประโยชน์ในด้านการอนุรักษ์ดินและน้ำ นอกจากนี้ แฝกยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นได้อีก เช่น ใช้ในงานหัตถกรรม เครื่องประดับ เครื่องตกแต่งบ้าน ของใช้ภายในครัวเรือน ใช้ในงานด้านเกษตรกรรม เช่น ปุ๋ยหมัก พืชคลุมดิน วัสดุมูลหาลังคา และใช้เป็นเชื้อเพลิง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2541ก; สำนักงาน กปร., 2545) นอกจากการใช้ประโยชน์ในด้านดังกล่าวมาแล้ว ยังมีการศึกษาการย่อยสลายและการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชจากหญ้าแฝกที่ฝังในดิน ที่ศูนย์ศึกษาและพัฒนาห้วยทราย พบว่า แฝกสามารถให้ปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ที่เป็น

ประโยชน์แก่พืชได้สูงถึง 4.3, 2.2 และ 20.5 กิโลกรัมต่อน้ำหนักแห้ง 1 ตัน ตามลำดับ (ประไพ และ วณิดา, 2544)

แฟกกับโลหะหนัก

การขยายผลการใช้ประโยชน์แฟก นอกเหนือจากการใช้ในด้านกร่อนุรักษ์ดินและน้ำตามโครงการพัฒนาและรณรงค์การใช้แฟกอันเนื่องมาจากพระราชดำริแล้ว ยังมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้แฟกในการบำบัดโลหะหนักด้วย โดย Truong and Baker (1998) ได้ศึกษาความทนโลหะหนักของแฟก เช่น สารหนู แคดเมียม ทองแดง โครเมียม และนิเกิล พบว่า แฟกสามารถทนต่อความเป็นพิษของโลหะหนักได้สูง เช่น สามารถทนสารหนู ที่ระดับความเข้มข้น 21 – 72 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ขณะที่พืชทั่วไปทนได้ ที่ระดับความเข้มข้น 1 – 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทนพิษแคดเมียมได้ ที่ระดับความเข้มข้น 45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่พืชทั่วไปทนได้ ที่ระดับความเข้มข้น 5 – 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และสามารถทนพิษนิเกิลได้ ที่ระดับความเข้มข้น 375 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ขณะที่พืชทั่วไปทนได้ ที่ระดับความเข้มข้น 0.02 – 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ Shu *et al.* (2002) ทำการวิจัยโดยปลูกแฟกและหญ้าอีก 3 ชนิดลงบนดินทางแร่ที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก พบว่า แฟกสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าหญ้าอื่นที่ทำการทดลอง Chen *et al.* (2000) ได้ใช้แฟกบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก เช่น สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง พบว่า แฟกสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินปนเปื้อนโลหะหนัก Truong and Claridge (2002) รายงานว่า หญ้าแฟกที่ปลูกในประเทศออสเตรเลีย สามารถดูดซึมธาตุสังกะสีได้ในปริมาณที่มากกว่า 750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดูดซึมแคดเมียมได้เท่ากับ 22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในประเทศไทย ธนียา (2538) ได้ทำการทดลองปลูกแฟกในดินที่รดด้วยน้ำเสียอุตสาหกรรมโรงนม พบว่า ความสูงของแฟกแต่ละแหล่งพันธุ์แตกต่างกัน และแฟกต่างแหล่งพันธุ์มีความสามารถในการดูดซึมโลหะหนักแตกต่างกัน Roongtanakiat and Chairroj (2001) ได้ทำการทดลองปลูกแฟกในดินปนเปื้อนแมงกานีส สังกะสี ทองแดง แคดเมียม และตะกั่ว พบว่า แฟกสามารถดูดซึมโลหะหนักเหล่านี้ได้ โดยปริมาณโลหะหนักที่สะสมในรากเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนวันปลูกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณโลหะหนักที่สะสมในส่วนของลำต้นลดลง เมื่อจำนวนวันปลูกเพิ่มขึ้น Roongtanakiat *et al.* (2002) ได้ทำการทดลองปลูกแฟกบริเวณน้ำชะฝักกลบขยะ พบว่า แฟกสามารถดูดซึมโลหะหนักในบริเวณที่มีน้ำชะฝักกลบขยะเข้มข้นได้ และโลหะหนักแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอในดินและรากแฟก อนุรักษ์ (2544) ได้ทำการปลูกแฟกบนทางแร่ตะกั่วและสังกะสี มีการใช้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยหมัก ผลการวิจัยพบว่า แฟกที่บนดินทางแร่ตะกั่วที่ระดับความเข้มข้นทางแร่ 100% ที่ได้รับการบำรุงด้วยปุ๋ยเคมีสามารถดูดซึมตะกั่วและสังกะสีได้มากถึง 182.7

มิลลิกรัม สิริลักษณ์ และ ธนุชัย (2548) ได้ทำการทดลองปลูกแฟกเพื่อดูดซึมแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินจากโรงงานถลุงแร่สังกะสี พบว่า หญาแฟกสามารถดูดซึมแคดเมียมได้สูงถึง 0.01 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง (รวมลำต้น ใบ และราก) สรตนา (2548) ได้ทำการศึกษาการดูดโลหะหนักในหญาแฟกที่ปลูกในดินปนเปื้อนสังกะสี แคดเมียม และตะกั่ว พบว่า แฟกมีการสะสมปริมาณสังกะสี แคดเมียม และตะกั่วอยู่ในลำต้นและใบ และแหล่งพันธุ์แฟกส่งผลต่อการดูดธาตุโลหะหนักของแฟก สุทธิรักษ์ และคณะ (2549) ทดลองปลูกแฟกในน้ำเสียอุตสาหกรรม พบว่า แฟกสามารถดูดซึมโลหะหนักในน้ำเสีย ได้แก่ แมงกานีส เหล็ก ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว ได้สูงสุด เท่ากับ 11.70, 37.02, 6.07, 1.96 และ 0.69 มิลลิกรัม ตามลำดับ

ธาตุโลหะหนัก (heavy metal) หมายถึง ธาตุที่มีค่าความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีเลขเชิงอะตอม (atomic number) ในช่วง 23-92 ธาตุโลหะหนักจัดเป็นธาตุพิษ (toxic element) ที่สามารถก่อให้เกิดมลพิษเมื่อมีการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม (คณาจารย์ภาควิชา, 2541) โดยเฉพาะการปนเปื้อนในดิน เนื่องจากสามารถถ่ายเทเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร และการสะสมในสิ่งมีชีวิตซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์ได้ (Cheney *et al.*, 2001) ธาตุโลหะหนักมีหลายธาตุ ในการวิจัยนี้ จะกล่าวถึง 3 ธาตุ เนื่องจากเป็นธาตุที่พบปนเปื้อนในดินเหมืองแร่สังกะสี ที่นำมาทำการทดลอง

สังกะสี

สังกะสี (Zinc, Zn) เป็นโลหะชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ส่วนใหญ่พบในรูปของสินแร่ sphalerite (ZnS) เมื่อนำสังกะสีมาถลุงจะได้โลหะที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ เช่น การชุบโลหะ ภาชนะเคลือบสี ยารักษาโรคผิวหนัง ยาฆ่าเชื้อโรค และผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางค์ เช่น โลชั่นบำรุงผิว ยาสระผม (ศุภมาส, 2540) นอกจากนี้ ในทางการเกษตรกรรมยังนำสังกะสีมาใช้เป็นสารคลุกเมล็ดพืชและปุ๋ย และเป็นปุ๋ยจุลินทรีย์ในดินสังกะสี จึงจัดเป็นแร่ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ และมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต ทั้งคน สัตว์ และพืช

การแพร่กระจายของสังกะสีออกสู่สิ่งแวดล้อมได้มากมาย จากการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติ และกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การถลุงแร่สังกะสีถ้าหากขาดการจัดการที่ดีจะส่งผลให้มีสังกะสีในรูปสารประกอบเป็นพิษมากกว่าในรูปธาตุหรือไอออนบวกตามธรรมชาติ โดยเฉพาะ

ส่งผลต่อคุณสมบัติของดินในด้านต่าง ๆ Alloway (1990, 1995) รายงานไว้ว่า การแพร่กระจายและการปนเปื้อนของสังกะสีในดินมีแหล่งที่มาจาก 4 แหล่ง คือ แหล่งแรกจากวัตถุดิบกำเนิดดิน ซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ที่เกิดจากกระบวนการผุพังในบริเวณนั้น ๆ ในดินทั่วไปพบความเข้มข้นของสังกะสีอยู่ในช่วง 10-300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Donald and Trantolo, 1994) แหล่งที่สองจากบรรยากาศ เช่น การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ถ่านหิน แหล่งที่สามจากการถลุงแร่ และแหล่งที่สี่จากการใช้กากตะกอนน้ำเสียในการเกษตร บางประเทศได้กำหนดความเข้มข้นของสังกะสีในกากตะกอนน้ำเสียที่นำมาใช้ด้านการเกษตร เช่น กลุ่มสหภาพยุโรป และประเทศอิตาลี ได้กำหนดค่าความเข้มข้นของสังกะสีสูงสุดที่ยอมรับได้ในกากตะกอนน้ำเสียที่นำมาใช้ในการเกษตร เท่ากับ 150-300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ พิชิต และ สุรสิทธิ์ (2542) ได้ประเมินความเสี่ยงของการปนเปื้อนสังกะสีในดินแต่ละท้องที่ของประเทศไทย โดยใช้ค่าในการประเมินความเสี่ยงของการปนเปื้อน เท่ากับ 71 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ความเป็นพิษของสังกะสีต่อสิ่งมีชีวิต ถ้าหากได้รับสังกะสีมากเกินไปจะเป็นอันตรายได้ ระดับความเป็นพิษขึ้นวิกฤตของสังกะสีในพืชทั่วไปมีค่าตั้งแต่ 100 ถึงสูงกว่า 400-500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พืชที่ได้รับสังกะสีมากเกินไปจะก่อให้เกิดความเป็นพิษ โดยอาการเด่นชัด คือ ใบอ่อนเหลืองซีดเนื่องจากขาดธาตุเหล็กในสถานะที่ได้รับสังกะสีมากเกินไป เพราะว่าธาตุทั้งสองมีขนาดของไอออนใกล้เคียงกัน นั่นคือ ถ้าพบความเข้มข้นของสังกะสีในดินมาก จะส่งผลให้รากพืชดูดเหล็กได้น้อยลง (ขงยุทธ, 2543; Boardman and McGuire, 1990) สำหรับความเป็นพิษที่มีต่อมนุษย์ โดยส่วนใหญ่ ร่างกายมนุษย์มักได้รับสังกะสีจากการใช้ภาชนะที่ชุบสังกะสีมาใส่อาหาร และถ้าอาหารมีสภาพเป็นกรดก็จะคัดกร่อนสังกะสีออกมาจากภาชนะปะปนอยู่ในอาหาร หากมีมากจะเกิดพิษต่อร่างกายได้ คือ เกิดอาการปวดท้อง อาเจียน คลื่นไส้ ช็อค และอาจถึงตายได้ (Underwood, 1977; Arena, 1976) การสัมผัสกับสารประกอบสังกะสีคลอไรด์ (Zinc chloride) และสารประกอบสังกะสีออกไซด์ (Zinc oxide) เข้าไปจะมีอาการใช้ คลื่นไส้ อาเจียน คอแห้ง ไอ อ่อนเพลีย ปวดศีรษะและปวดตามร่างกาย (Sunderman, 1971) ส่งผลต่อการทำงานของระบบควบคุมหรือระบบเมแทบอลิซึม (metabolism) ในร่างกาย และก่อให้เกิดมะเร็งได้ (ศุภมาส, 2540)

แคดเมียม

แคดเมียม (Cadmium, Cd) เป็นธาตุที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ อยู่ในรูปของสินแร่ Greenock (CdS) ปะปนอยู่กับแร่อื่นอีก เช่น สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง (Mcneely *et al.*, 1979) ส่วนมากมักพบแคดเมียมร่วมกับแร่สังกะสี ดังนั้น ผลพลอยได้จากการถลุงแร่สังกะสี คือ แคดเมียม และได้้นำแคดเมียมไปใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น ผสมในน้ำมันเครื่องบางชนิด อุตสาหกรรมรถยนต์ ทำแบตเตอรี่ เซลล์สุริยะ และอุตสาหกรรมพลาสติก นอกจากนี้ยังใช้ในสารกำจัดเชื้อราด้วย (พิมล และ ชัยวัฒน์, 2525; Reilly, 1980)

การแพร่กระจายของแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อม เกิดจากการพังทลายของเปลือกโลกและการกระทำของมนุษย์ ทำให้เกิดการแพร่กระจายแคดเมียมในบรรยากาศ พื้นดินและแม่น้ำลำธาร การถลุงแร่ อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับแคดเมียม กิจกรรมเหล่านี้ทำให้แคดเมียมแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม (Nabbs and Pearce, 1976; Mcneely *et al.*, 1979) กลุ่มสหภาพยุโรปและประเทศอิตาลีได้กำหนดความเข้มข้นของแคดเมียมสูงสุดที่ยอมรับให้มีได้ในตะกอนน้ำเสียที่นำมาใช้ในการเกษตร ในช่วง 1-3 และ 1-5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ Alloway (1990, 1995) ได้รายงานว่า ระดับวิกฤตสูงสุดของแคดเมียมในดินที่ยอมรับได้ อยู่ในช่วง 3-8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม บริเวณพื้นที่ใกล้แหล่งแร่สังกะสี มักพบการปนเปื้อนของแคดเมียมร่วมกับสังกะสีในอัตราส่วนประมาณ 1: 100 ถึง 1: 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และดินบริเวณรอบเหมืองแร่สังกะสีในระยะ 1 กิโลเมตร มีการปนเปื้อนของแคดเมียมสูงถึง 1,750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ศุภมาส, 2540) จากการศึกษาดินในพื้นที่ๆ เกี่ยวข้องการปนเปื้อนแคดเมียมบางแห่งในประเทศไทย มีปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยเท่ากับ 1.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และตัวอย่างดินในพื้นที่ๆ ได้รับน้ำเสียและกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงานมีปริมาณแคดเมียมเฉลี่ยสูงถึง 51.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (นิตยา และ จุไร, 2537) พิชิต และ สุรสิทธิ์ (2542) ได้ประเมินความเสี่ยงของการปนเปื้อนแคดเมียมในดินแต่ละท้องที่ของประเทศไทย โดยใช้ค่าในการประเมินความเสี่ยงของการปนเปื้อน เท่ากับ 0.074 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ความเป็นพิษของแคดเมียม แคดเมียมเป็นสารพิษที่อันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ เนื่องจากแคดเมียมสามารถสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ทำให้เกิดพิษต่อร่างกายหลายลักษณะ เช่น ถ้าสูดควันออกไซด์ของแคดเมียมจะเป็นอันตรายต่อปอดจับปอด เกิดปอดอักเสบ หรือน้ำท่วมปอด (Friberg *et al.*, 1976) แคดเมียมแสดงความเป็นพิษเรื้อรังต่ออวัยวะภายในร่างกาย เช่น ระบบเลือด กระดูกพรุน และโรคไตอักเสบ เป็นต้น ค่าความเป็นพิษเฉียบพลันของแคดเมียมอยู่ในช่วง 350-3,500

มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งทำให้ถึงขั้นเสียชีวิตได้ (Chaney *et al.*, 2001) นอกจากนี้ถ้าร่างกายได้รับ แคลเซียมเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อเมแทบอลิซึม ขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ ทำให้เกิดโรคความดันโลหิตสูงและโลหิตจาง (Reilly, 1980) สำหรับสัตว์ที่ได้รับแคลเซียมประมาณ 1,300 ไมโครกรัมต่อวัน จะเกิดโรคโลหิตจาง ความดันโลหิตสูง อัตราการเจริญเติบโตช้า และมีอายุสั้น (ไมตรี, 2531; ยุพดี, 2544) ส่วนระดับความเป็นพิษขึ้นวิกฤตของแคลเซียมในพืชนั้น อยู่ในช่วง 4-200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Alloway, 1990, 1995) ในดินที่มีแคลเซียมสูงถึงขั้นเป็นพิษต่อพืช พืชเริ่มแสดงอาการที่ใบอ่อน คือ เนื้อเยื่อระหว่างเส้นใบมีสีเหลืองซีด ปลายใบม้วน ต้นแคระแกร็น (คณาจารย์ภาค ปฐพีวิทยา, 2541; ยงยุทธ, 2543; John, 1978)

เหล็ก

เหล็ก (Iron, Fe) เป็นธาตุอาหารพืชอยู่ในกลุ่มจุลธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในดิน เหล็กในดินส่วนมากมักอยู่ร่วมกับธาตุอื่น ๆ ในรูปของออกไซด์ในแร่ เช่น ferromagnesian silicate ฮีมาไตต์ แมกนีไทต์ ไพไรต์ และไลโมนาइट และเป็นองค์ประกอบของแร่ทุติยภูมิ เช่น แร่ดินเหนียว (ชัยฤกษ์, 2536; สุริยา และคณะ, 2544) เหล็กละลายได้ดีในสภาพน้ำขัง อากาศถ่ายเทไม่สะดวก โดยอยู่ในรูปของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) รวมทั้งในสภาพดินเป็นกรดเหล็กก็ละลายได้ดี ในสภาพที่อากาศถ่ายเทได้ดี เหล็กอยู่ในรูปของเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ที่ละลายได้ยากรวมทั้งสภาพดินที่เป็นด่างด้วย

การแพร่กระจายของเหล็กในสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่ในดิน ในสภาพต่างจะทำให้เกิดสารละลายประกอบเหล็กขึ้น เหล็กที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะตกตะกอน ในรูปของออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ เหล็กอาจเข้าไปแทนที่แคตไอออน (cation) ในแร่ต่าง ๆ และอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ดินที่มีอินทรีย์วัตถุมาก ๆ เหล็กจะอยู่ในรูปคีเลต (chelate) (Pendias and Pendias, 1992) เหล็กเป็นธาตุที่พบได้มากที่สุดทั้งในดินและในพืช ในดินทั่วไปจะมีเหล็กอยู่ตั้งแต่ 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จนถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักดิน ส่วนในพืชจะมีเหล็กประมาณ 50 – 250 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับสังกะสี และแคลเซียม (สุริยา และคณะ, 2544)

ความเป็นพิษของเหล็ก โดยปกติแล้วเกลือของเหล็กไม่เป็นพิษ แต่ถ้าเข้าสู่กระแสเลือด เช่น เกลือเฟอร์ริก ($FeSO_4$) จะแสดงความเป็นพิษได้ มีผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง สาเหตุเนื่องจากระบบหายใจล้มเหลว อาการเป็นพิษที่แสดงในคน เช่น อาเจียน ท้องร่วง ระคายเคือง และ

ปวดท้อง สำหรับพืชที่ขาดเหล็ก จะแสดงอาการที่ใบอ่อน โดยเนื้อใบระหว่างเส้นใบเป็นสีเหลือง บริเวณเส้นใบเป็นสีเขียว (ปรีดา และ พิชิต, 2535; คณาจารย์ปฐพีวิทยา, 2541; ยงยุทธ, 2543)

ระดับมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของโลหะหนักในดิน

พิชิต และ สุรสิทธิ์ (2542) ได้ทำการประเมินและกำหนดระดับเกณฑ์พื้นฐาน (background levels) หรือระดับตรวจสอบ (investigation levels) ของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทย ซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่นำมาใช้ประเมินการปนเปื้อนระยะแรก บ่งชี้ถึงระดับความเข้มข้นของโลหะหนักที่ทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดมลพิษในสภาพแวดล้อม และอาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ โดยการสำรวจและเก็บตัวอย่างดินชั้นบนในพื้นที่ทำการเกษตร และแปลงทดลองปุ๋ยระยะยาวทุกภาคของประเทศไทย จำนวน 318 ตัวอย่าง กำหนดโดยค่าความเข้มข้นที่ 95 เปอร์เซนต์ไทล์ เป็นระดับเกณฑ์พื้นฐานความเข้มข้นของสังกะสี และแคดเมียม ในดินของประเทศไทย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 71 และ 0.074 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมัก เป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ได้จากการนำวัสดุอินทรีย์จากพืช และสัตว์ทางการเกษตร และจากชุมชนมาผลิตด้วยกรรมวิธีทำให้ขึ้น มีการสับ บด ร่อน และผ่านกรรมวิธีการหมักอย่างสมบูรณ์ จนแปรสภาพจากเดิม ซึ่งกระบวนการหมักเป็นการย่อยสลายทางชีววิทยา โดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์บางชนิดภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ซึ่งจะย่อยสลายสารอินทรีย์จนกลายเป็นปุ๋ยที่มีลักษณะนุ่มชุ่มชื้น ขาดจากกันได้ง่าย เหมาะที่จะใส่บำรุงดิน เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน ช่วยให้ดินร่วนซุย และอุ้มน้ำได้ดี (วรพจน์, 2529; มุกดา, 2543, 2547; กรมวิชาการเกษตร, 2548)

ปุ๋ยหมัก เมื่อใส่ลงในดิน จะมีการย่อยสลายตัวช้า ทำให้สามารถปรับปรุงบำรุงดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ปุ๋ยหมักสามารถนำไปใช้กับพืชได้หลายชนิด ในดินทุกประเภท แต่อัตราที่ใช้จะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับสภาพดิน พื้นที่ปลูก ภูมิอากาศ โดยสามารถประเมินการใช้ปุ๋ยหมักได้ดังนี้

การใช้ปุ๋ยหมักกับพืชผัก ซึ่งเป็นพืชที่มีการเจริญเติบโตเร็ว ต้องการธาตุอาหารปริมาณมาก ในช่วงระยะสั้น ๆ การใช้ปุ๋ยหมักได้ทั้งแบบหว่านแล้วไถกลบดิน หรือใส่ลงในหลุม อัตราที่แนะนำ เช่น ถั่วฝักยาว ใส่อัตรา 1.5-2 ตันต่อไร่ พริก 3-4 ตันต่อไร่ เป็นต้น (กรมวิชาการเกษตร, 2548)

ปุ๋ยหมักสามารถใช้กับพืชไร่และนาข้าว ปริมาณการใช้ขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ และสภาพดิน อัตราที่แนะนำในการใส่ปุ๋ยหมักประมาณ 500-1,000 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี โดยการหว่านให้กระจายสม่ำเสมอ แล้วไถกลบดิน ควรใส่ก่อนปลูก 1-3 สัปดาห์ เพื่อป้องกันการเกิดก๊าซ หรือสารพิษที่อาจเป็นอันตรายต่อพืช การใช้ปุ๋ยหมักกับพืชไร่และนาข้าว นอกจากจะเป็นการช่วยเพิ่มธาตุอาหารให้กับพืช ยังช่วยปรับโครงสร้างของดินที่ผ่านการเพาะปลูกอย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลานานให้ดีขึ้นจาก (กรมวิชาการเกษตร, 2548) นอกจากนี้ อรรวรรณ และคณะ (2549) ได้ศึกษาคุณค่าการเติมถ่านล่อยลิกไนต์ และปุ๋ยหมักในการปลูกข้าวพันธุ์ปทุมธานี พบว่า ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นจากเดิม 350 กิโลกรัมต่อไร่ เป็น 661 กิโลกรัมต่อไร่ อินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีการดูดซึมและสะสมธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และซิลิกอนในฟางข้าวได้สูงถึง 0.73%, 0.077%, 2.59% และ 14.198% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังนั้น ถ่านล่อยลิกไนต์และปุ๋ยหมัก นอกจากจะช่วยเพิ่มผลผลิต และเพิ่มอินทรีย์วัตถุในดินแล้ว ยังสามารถเป็นแหล่งธาตุอาหารเพื่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวได้ด้วย

สำหรับไม้ผล ซึ่งเป็นพืชที่มีอายุยาว และมีระบบรากลึก ควรใส่ปุ๋ยหมักในระยะหลังการเก็บผลผลิต ในกรณีที่ปลูกพืชใหม่ ควรใส่ปุ๋ยหมักรองก้นหลุม ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ในไม้ผลขนาดเล็กจะใช้อัตราประมาณ 15-25 กิโลกรัมต่อหลุมที่มีขนาดกว้าง ยาว และลึก 50 เซนติเมตร ใช้ผสมจากดินที่ขุดจากหลุมในอัตรา 1: 2-3 ส่วน ไม้ผลที่โตแล้ว อาจใส่โดยการขุดหลุมหรือร่องรอบรัศมีทรงพุ่มลึกประมาณ 30 เซนติเมตร ควรแบ่งปุ๋ยบางส่วนหว่านบาง ๆ บริเวณทรงพุ่ม เพื่อเป็นธาตุอาหารของรากที่อยู่บริเวณผิวดิน หรือใส่โดยวิธีการคลุมดินบริเวณทรงพุ่ม โดยรอบต้น (กรมวิชาการเกษตร, 2548)

ปุ๋ยหมักยังใช้กับไม้ดอกไม้ประดับได้เป็นอย่างดี ถ้าเป็นการปลูกในแปลง สามารถใช้ปุ๋ยหมักหว่านคลุมแปลงหนาประมาณ 1-3 นิ้ว แล้วผสมคลุกเคล้ากับดิน นอกจากนี้ ปุ๋ยหมักยังสามารถนำมาทำเป็นวัสดุปลูกสำหรับไม้กระถางได้ โดยใช้ปุ๋ยหมักอัตรา 1 ส่วนผสมดิน 2 ส่วน หรือวัสดุปลูกสำหรับเพาะเมล็ดหรือต้นกล้า โดยการผสมปุ๋ยหมัก 1 ส่วนทราย 1 ส่วน และดิน 2 ส่วน

เพื่อให้วัสดุปลูกมีลักษณะร่วนซุย มีอากาศถ่ายเทได้ดี เหมาะสมต่อการเจริญของรากพืช (กรมวิชาการเกษตร, 2548)

การวิเคราะห์โลหะหนัก

การวิเคราะห์โลหะหนักในพืชและดินนั้น มีหลายวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น การวาวรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS) อิมิซชันสเปกโทรสโกปี (Emission Spectroscopy, ES) นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, NMRS) และการกระตุ้นด้วยนิวตรอน (Neutron Activation Analysis, NAA) ในที่นี้ใช้ 2 วิธี คือ การวาวรังสีเอกซ์ ในการวิเคราะห์โลหะหนักในตัวอย่างดินและพืช ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างได้หลาย ๆ ธาตุในครั้งเดียว (แม่น และ อมร, 2539; สัมพันธ์, 2541; Whiston, 1987; Johansson and Campbell, 1988) และใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี ในการวิเคราะห์ธาตุอาหารพืชและโลหะหนักในดินแปลงที่ปลูกในดินเหมือนแร่สังกะสี

การวาวรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence, XRF)

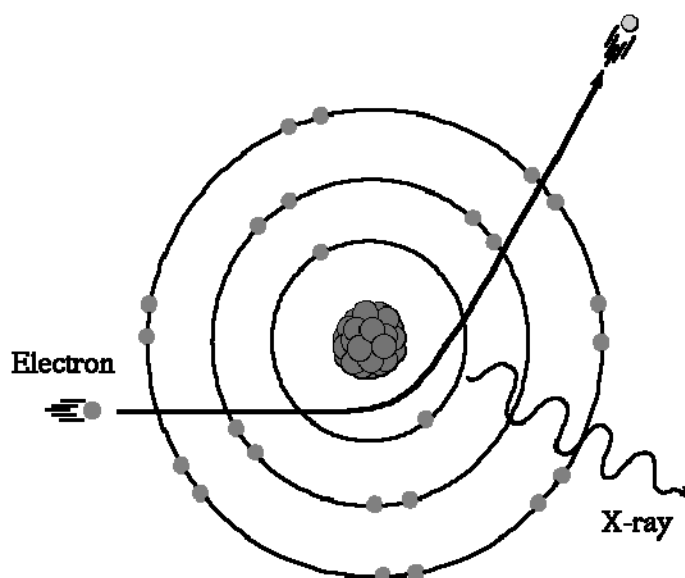
เทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ เป็นการวิเคราะห์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (non-destructive analysis) สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งธาตุเดี่ยวทีละธาตุ หรือวิเคราะห์หลาย ๆ ธาตุพร้อมกัน

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.01 – 5.00 นาโนเมตร (nm) ถูกปล่อยออกมาโดยอะตอมของธาตุภายหลังถูกกระตุ้นด้วยวิธีการใดวิธีการหนึ่ง ซึ่งกระบวนการเกิดรังสีเอกซ์จะให้ลักษณะของสเปกตรัมที่แตกต่างกัน รังสีเอกซ์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามกระบวนการของการปลดปล่อยพลังงานส่วนที่เกิน จากอะตอมบริเวณชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนคือ

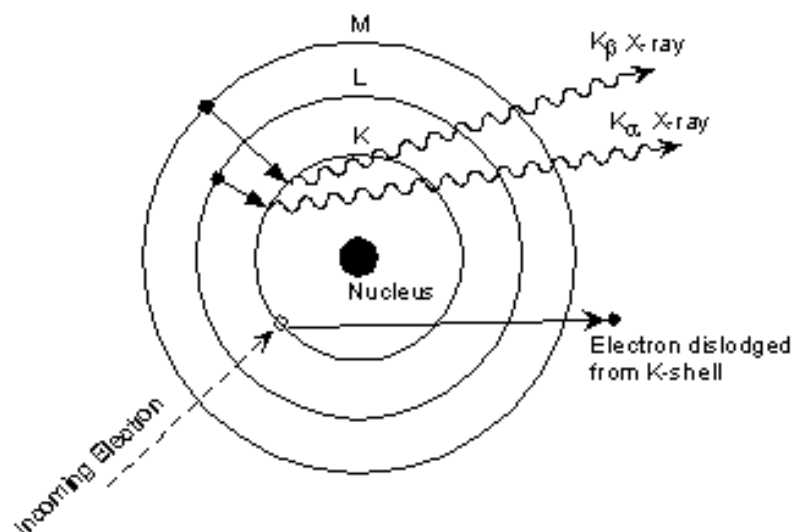
รังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (continuous X-ray) เป็นรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานแผ่คลุมค่าพลังงานเป็นบริเวณกว้าง หรือเรียกอีกแบบหนึ่งว่า รังสีเอกซ์แบบเบรมสตราลุง (Bremsstrahlung) เกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าใกล้นิวเคลียสของเป้า ทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงาน และ

เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ พลังงานที่สูงสูญเสียไปจะเปลี่ยนไปเป็นเบรมส์สตราลุง ดังภาพที่ 1 (สัมพันธุ์, 2541; นวลฉวี, 2545)

รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-ray) เกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งชนอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมของเป้า ทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรของเป้าหลุดออกจากวงโคจร อิเล็กตรอนวงถัดไปจะลดพลังงานเข้ามาแทนที่ โดยการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ และพลังงานที่ถูกปล่อยออกมามีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นของวงโคจรอิเล็กตรอน ซึ่งมีค่าพลังงานเฉพาะตัว ดังนั้น รังสีเอกซ์ชนิดนี้เรียกว่า “รังสีเอกซ์เฉพาะตัว” ดังภาพที่ 2 (นวลฉวี, 2545)



ภาพที่ 1 การเกิดรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง หรือรังสีเอกซ์แบบเบรมส์สตราลุง (Brmsstrahlung)
ที่มา: Tertan (2005)

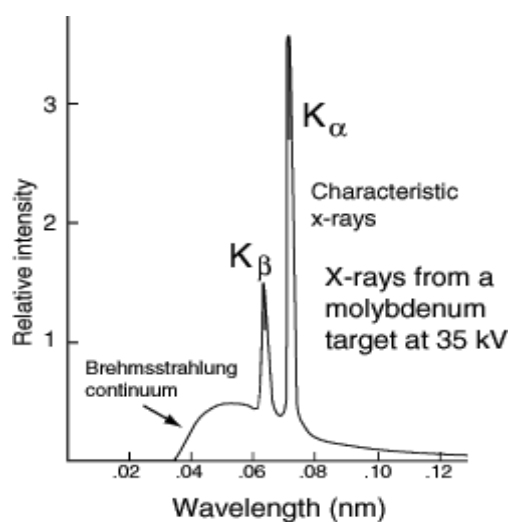


ภาพที่ 2 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-ray)

ที่มา: Tulane University (2005)

รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ปลดปล่อยออกมา เกิดจากการแทนที่ของอิเล็กตรอนในชั้น K (K shell) เรียกว่า รังสีเอกซ์เค-แคแรกเทอริสติก (K-characteristic X-rays) หรือหากแทนที่ว่างในวง L หรือ M เรียกว่า รังสีเอกซ์แอล-แคแรกเทอริสติก (L- characteristic X-rays) และรังสีเอกซ์เอ็ม-แคแรกเทอริสติก (M- characteristic X-rays) ตามลำดับ จะได้ลักษณะสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ ดังภาพที่ 3

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ เป็นการศึกษาทางสเปกโทรสโกปีที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยพลังงาน ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยม และถูกนำไปใช้หลายทาง เพื่อตรวจวัดธาตุที่เป็นองค์ประกอบในสารตัวอย่างต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ มีหลักการ คือ ต้องมีการกระตุ้นสารตัวอย่างก่อนด้วยรังสีเอกซ์ อะตอมของธาตุต่าง ๆ ในสารตัวอย่างหลังจากถูกกระตุ้นก็จะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์เฉพาะ ซึ่งจะมีพลังงานอยู่ในช่วงประมาณ 1–60 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ขีดจำกัดในการตรวจหา (detection limit) สามารถตรวจได้ถึงระดับ 1 ppm และถ้าใช้สารตัวอย่างแบบฟิล์มบาง (thin film) สามารถตรวจได้ถึงระดับต่ำกว่า 1 ppm ได้ การใช้เครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท (Jones, 1982) คือ

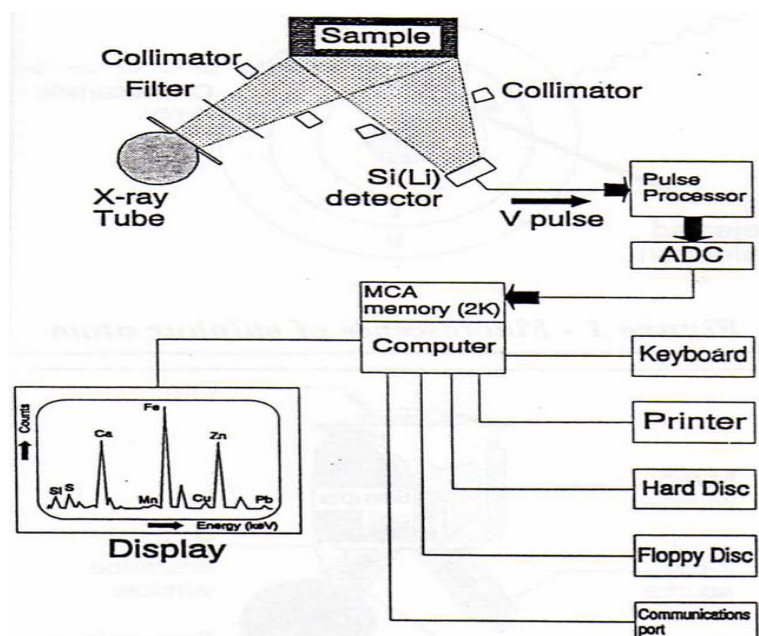


ภาพที่ 3 สเปกตรัมของรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องจากเบรมสตราลุง และสเปกตรัมเชิงเส้นจากรังสีเอกซ์เฉพาะตัว ที่ใช้เป้าเป็นโมลิบดีนัม

ที่มา: Fisica (2005)

ระบบการกระจายพลังงาน (energy dispersion system) หรือระบบการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X – ray Fluorescence system, EDXRF) เป็นระบบที่วิเคราะห์รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างโดยตรง โดยที่ต้นกำเนิดรังสี ทำอันตรกิริยากับธาตุต่าง ๆ ในสารตัวอย่าง ทำให้ธาตุนั้นปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ผ่านมายังตัวรับสัญญาณ และมีการแสดงผลออกมาในรูปแบบของกราฟ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ กับค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ในหน่วยกิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) ดังภาพที่ 4

ระบบการกระจายความยาวคลื่น (wavelength dispersion system) หรือระบบการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น (Wavelength Dispersive X – ray Fluorescence system, WDXRF) เป็นระบบวิเคราะห์รังสีเอกซ์ที่เกิดจากสารตัวอย่าง โดยต้นกำเนิดรังสีทำอันตรกิริยากับธาตุต่าง ๆ ในสารตัวอย่าง ทำให้ธาตุนั้นปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องบังคับลำรังสีให้ไปในทิศทางตกกระทบกับผลึกวิเคราะห์ เพื่อให้ผ่านการแยกหรือกระจายรังสีให้มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กันนี้ จะผ่านเครื่องบังคับลำรังสีตัวที่สองเพื่อให้รังสีผ่านไปยังตัวรับสัญญาณ และมีการแสดงผลเป็นกราฟ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับความยาวคลื่น ดังภาพที่ 5 การวิเคราะห์รังสีเอกซ์ในลักษณะนี้ อาศัยหลักการเลี้ยวเบน (diffraction) ของรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

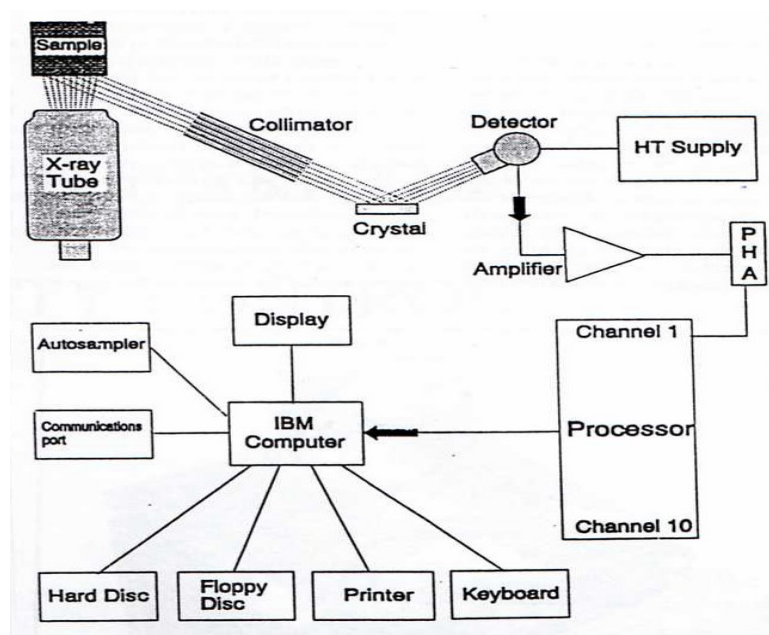


ภาพที่ 4 ระบบการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน

ที่มา: Williamson and Andy (1996)

การวิจัยในครั้งนี้ ใช้การวิเคราะห์ด้วยระบบการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน ซึ่งเป็นที่นิยมใช้มาก เนื่องจากทำได้ง่าย รวดเร็ว และเป็นวิธีที่มีระบบไม่ยุ่งยาก (แม่น และอมร, 2539; สัมพันธ์, 2541, Whiston, 1987) โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ มีวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ 2 ประการ คือ

การวิเคราะห์คุณภาพ (qualitative analysis) เป็นการแสดงว่า ในสารตัวอย่างมีธาตุใดเป็นองค์ประกอบ โดยระบบกระจายพลังงาน รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจากสารตัวอย่าง มีการกระจายพลังงานในลักษณะสเปกตรัมของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว โดยพิก (peak) ที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับพลังงาน แสดงถึงธาตุที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในสารตัวอย่างได้

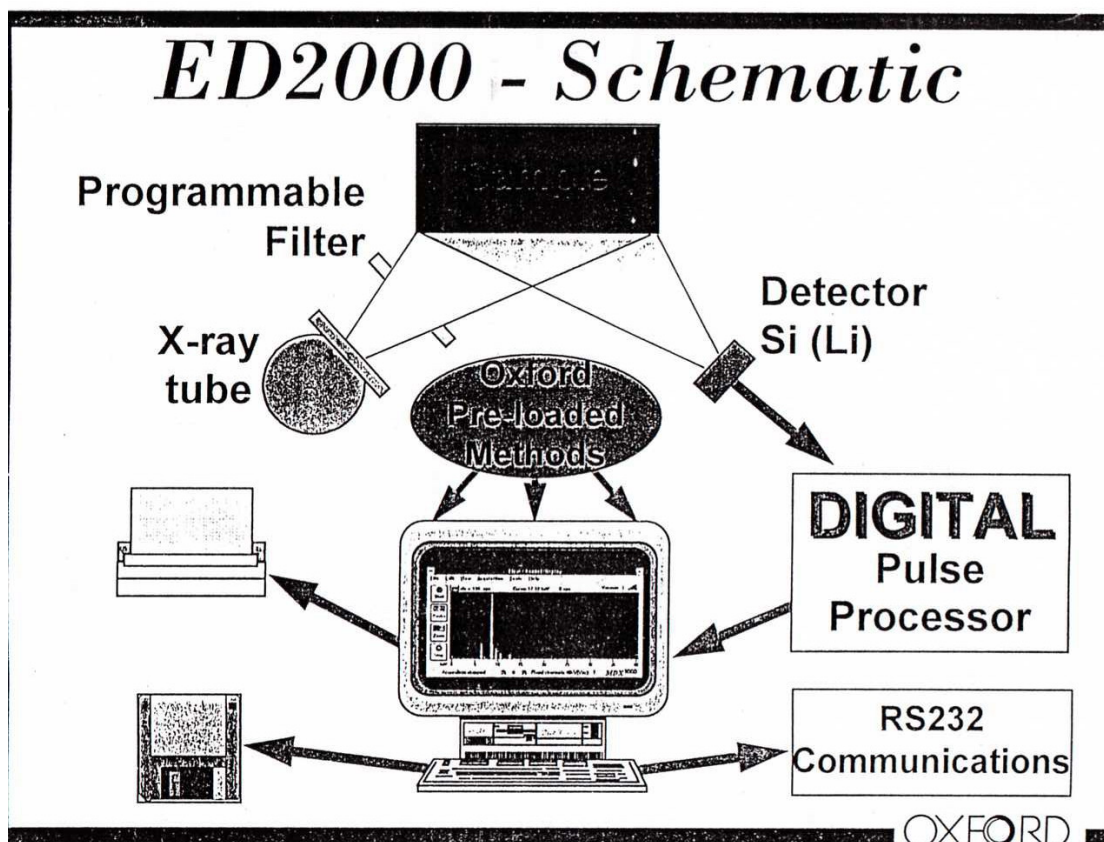


ภาพที่ 5 ระบบการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น

ที่มา: Williamson and Andy (1996)

การวิเคราะห์ปริมาณ (quantitative analysis) การวิเคราะห์นี้แสดงถึงปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยการวัดความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น เปรียบเทียบกับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้จากสารมาตรฐาน

หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน มีหลักการทำงานที่สำคัญ (ภาพที่ 6) คือ รังสีจากหลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) ทำอันตรกิริยากับธาตุต่าง ๆ ในสารตัวอย่าง ทำให้ธาตุเหล่านั้นปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัวออกมา ถ้ารังสีเอกซ์เฉพาะตัวเหล่านี้ จะผ่านไปยังตัวรับสัญญาณซึ่งเป็นหัววัดแบบ Si(Li) (lithium-drifted silicon detector) รังสีเอกซ์จะถูกเปลี่ยนให้เป็นประจุโดยตัวรับสัญญาณ ประจุที่เกิดขึ้นมีสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้ามา สัญญาณจะถูกส่งต่อไปยังอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier) ซึ่งทำหน้าที่แปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล และส่งต่อไปยังเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (multi-channel analyzer) โดยทั่วไปจะมี 100 ช่อง ใน 1 ช่อง สามารถจุพลังงานรังสีได้ 20 อิเล็กตรอนโวลต์ จึงทำให้สามารถวิเคราะห์รังสีได้ครอบคลุมช่วงพลังงานรังสีตั้งแต่ 0-20 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยข้อมูลสัญญาณที่ได้จะถูกแสดงผลออกมาอย่างต่อเนื่อง ในรูปแบบของสเปกตรัมหรือกราฟ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีกับระดับพลังงาน



ภาพที่ 6 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน บริษัท

Oxford รุ่น ED 2000

ที่มา: Williamson and Andy (1996)

ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ อาจมีการคลาดเคลื่อนได้ จากอิทธิพลของเมทริกซ์ (matrix effect) ซึ่งอาจมาจากสาเหตุสำคัญ คือ การเกิดอันตรกิริยาระหว่างธาตุ และผลทางกายภาพ ของสารตัวอย่าง โดยในทางปฏิบัติต้องมีการแก้ไขเพื่อกำจัด หรือลดผลที่เกิดจากอิทธิพลเมทริกซ์ให้เหลือน้อยที่สุด โดยทำการแก้ค่าเมทริกซ์ (matrix correction) ซึ่งมีหลายวิธี ได้แก่

- 1) วิธีเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน (comparison standards)
- 2) เทคนิคฟิล์มบาง (thin film technique)
- 3) เทคนิคการเจือจาง (dilution technique)
- 4) เทคนิคการเติมสารมาตรฐาน (standard addition technique)
- 5) เทคนิคการเติมสารที่มีสมบัติคล้ายสารมาตรฐาน (internal standard technique)

- 6) วิธีการแก้ค่าการกระเจิง (scatter correction)
- 7) วิธีการแก้ค่าทางคณิตศาสตร์ (mathematical correction)

สำหรับการเลือกวิธีเพื่อที่จะลดอิทธิพลของเมทริกซ์ต้องไม่ลืมว่า สารตัวอย่างจะต้องเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน ขนาดของอนุภาคจะต้องละเอียดมาก ๆ และผิวหน้าจะต้องเรียบ การวิจัยในครั้งนี้ใช้วิธีเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

วิธีเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน

การเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ต้องสร้างกราฟมาตรฐาน (standard curve) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ที่วัดได้ กับปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่สนใจ การสร้างกราฟ โดยการนำสารมาตรฐานที่ทราบค่าความเข้มข้นแน่นอนต่าง ๆ กัน มาหาอัตราการนับรังสีต่อหน่วยเวลา แล้วนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟ สารมาตรฐานที่ใช้ควรมีความเข้มข้นครอบคลุมความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่ต้องการหา เมื่อนำสารตัวอย่างที่ไม่ทราบความเข้มข้นไปวัดค่าความเข้มของรังสี แล้วนำมาเปรียบเทียบกับความเข้มของรังสีที่เกิดจากสารมาตรฐาน จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1

$$\frac{I_u}{I_s} = \frac{C_u}{C_s} \quad (1)$$

เมื่อ	I_u	คือ ความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ที่วัดได้จากสารตัวอย่าง
	I_s	คือ ความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ที่วัดได้จากสารมาตรฐาน
	C_u	คือ ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง
	C_s	คือ ความเข้มข้นของสารมาตรฐาน

ในการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธีนี้ สารตัวอย่างและสารมาตรฐาน ต้องมีลักษณะเดียวกัน คือ มีลักษณะและองค์ประกอบในเนื้อสารเหมือนกัน จึงจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนใกล้เคียงกันมากที่สุด (แม้น และ อมร, 2539)

อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS)

เทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี มีการพัฒนาขึ้นมาก เป็นเทคนิคที่ให้ความเที่ยงตรง แม่นยำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณลักษณะที่เด่นชัดสองประการ คือ ประการแรก มีความไวของการวิเคราะห์สูง สามารถวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในความเข้มข้นต่ำ ๆ ได้ ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของธาตุจะน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ppm) และประการที่สอง คือ มีความจำเพาะสูง สามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ของธาตุแต่ละชนิดในสารตัวอย่างได้ถูกต้อง โดยสามารถวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ได้ถึง 67 ธาตุ (แม้น และ อมร, 2539; Welz, 1985; Ebdon *et al.*, 1998) เทคนิคนี้ มาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างแสงกับอะตอม ซึ่งขอกกล่าวโดยสังเขป ดังนี้

อันตรกิริยาระหว่างแสงกับอะตอมเกิดได้ 3 แบบ คือ การดูดกลืนแสง (absorption) การปล่อยแสง (emission) และการวาวแสง (fluorescence) ทั้งสามกระบวนการนี้ เป็นการเปลี่ยนระดับพลังงาน (transition) จากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นระดับแรก (first excited state) มีความแตกต่างกันดังนี้

การดูดกลืนแสง โดยปกติ อะตอมอิสระจะอยู่ที่ระดับพลังงานต่ำสุด หรือสถานะพื้น (ground state) เมื่ออะตอมดูดกลืนแสง หรือพลังงานจากโฟตอน เฉพาะอิเล็กตรอนวงนอกสุด (valence electron) ของอะตอมจะเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงาน จากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น (excited state)

การปล่อยแสง เป็นกระบวนการที่ตรงกันข้ามกับการดูดกลืนแสง นั่นคือ อะตอมที่สถานะกระตุ้นเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานกลับมาที่สถานะพื้น โดยการปล่อยพลังงานออกมาเป็นรูปโฟตอน พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอะตอมไปยังสถานะกระตุ้น อาจเป็นพลังงานความร้อน หรือพลังงานเคมีก็ได้ แต่ไม่ใช่พลังงานแสง

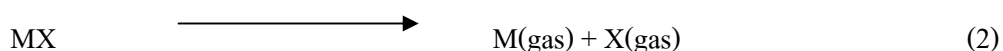
การวาวแสง เป็นกระบวนการที่รวมเอากระบวนการดูดกลืนแสง และการปล่อยแสงเข้าด้วยกัน คือ มีการดูดกลืนแสง ทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดเปลี่ยนระดับพลังงานไปยังสถานะกระตุ้น และเมื่อกลับสู่สถานะพื้น จะปล่อยแสงออกมาในรูปโฟตอน

จากกระบวนการดูดกลืนแสง การปล่อยแสง และการวาวแสง ทำให้อะตอมมีสเปกโตรสโกปีแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ อะตอมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี (atomic absorption spectroscopy, AAS) อะตอมิกอิมิชชันสเปกโตรสโกปี (atomic emission spectroscopy, AES) และอะตอมิกฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรสโกปี (atomic fluorescence spectroscopy, AFS) (นวาศรี, 2535)

หลักการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี

การวิเคราะห์ด้วยอะตอมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี เป็นเทคนิคที่ให้ความไวของการวิเคราะห์สูง โดยมีหลักการ คือ เมื่ออะตอมดูดกลืนแสงที่มีความยาวเฉพาะตัวของแต่ละธาตุ ทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบเกิดอิเล็กตรอนอิสระ โดยพลังงานที่อะตอมดูดกลืนเข้าไปนั้นอาจอยู่ในรูปต่าง ๆ กัน เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ หรือความร้อนจากไฟฟ้า ซึ่งพลังงานความร้อนนี้จะทำให้เกิดกระบวนการแตกตัว (dissociation) หรือแตกตัวเป็นไอออน (ionization) หรือทำให้อะตอมอยู่ในสถานะกระตุ้นก็ได้

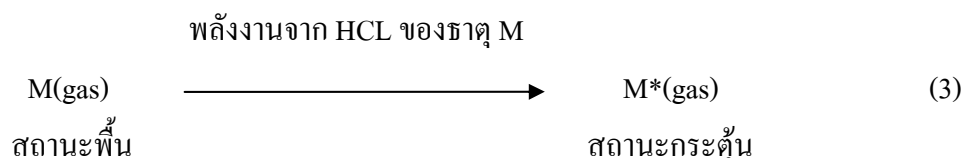
เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการวัดการดูดกลืนแสงโดยอะตอม เป็นการวิเคราะห์ธาตุในสารตัวอย่าง ขณะที่ธาตุที่ต้องการวิเคราะห์อยู่ในรูปอะตอมอิสระ ซึ่งทำโดยการใช้เปลวไฟเพื่อให้เกิดอะตอมอิสระ (flame atomization) หรือใช้ไฟฟ้าในการให้พลังงานความร้อน ซึ่งถือว่าเป็นการทำให้เกิดอะตอมอิสระโดยไม่ใช้เปลวไฟ (non-flame atomization) เพื่อให้ธาตุที่อยู่ในรูปสารประกอบ แตกตัวออกกลายเป็นอะตอมอิสระในสถานะก๊าซ ดังสมการที่ 2



เมื่อ	MX	คือ	โมเลกุลของสารประกอบในสารตัวอย่าง
	M	คือ	ธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งอยู่ในรูปของอะตอมอิสระในสถานะก๊าซ
	X	คือ	อะตอมหรือโมเลกุลของสารประกอบส่วนที่ไม่ต้องการวัดในสถานะก๊าซ

อะตอมอิสระที่เกิดขึ้น ส่วนใหญ่อยู่ในสถานะพื้น เมื่อผ่านการให้คลื่นแสงเฉพาะธาตุจากแหล่งกำเนิดคลื่นแสง ชนิด Hollow Cathode Lamps (HCL) จะทำให้อะตอมอิสระถูกกระตุ้นไปอยู่ชั้นพลังงานที่สูงขึ้น หรืออยู่ในสถานะกระตุ้น เช่น การวิเคราะห์โลหะหนัก M จะใช้ HCL ที่เคลื่อน

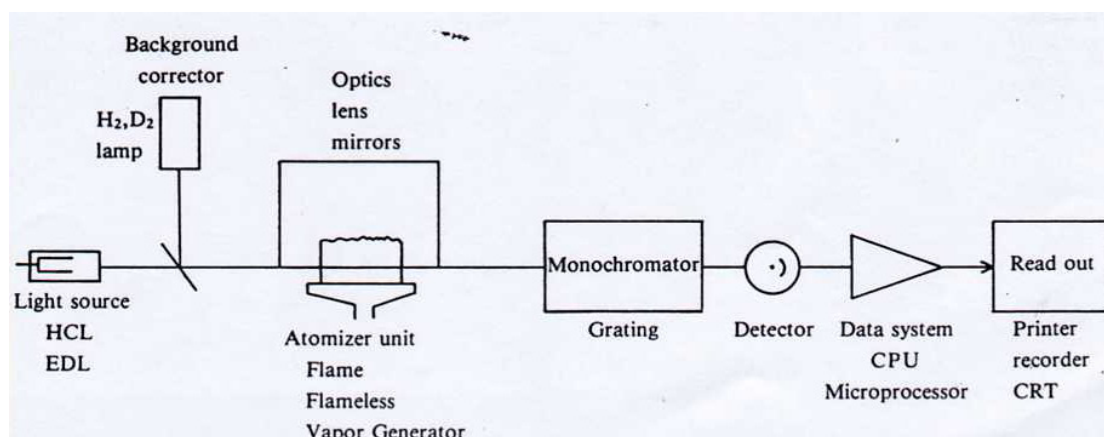
M เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแสง เพื่อให้ธาตุ M จากสถานะพื้น ดูดพลังงานจากคลื่นแสง ขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น ดังสมการที่ 3 (นวลศรี, 2535; Ebdon *et al.*, 1998)



ถ้าในสารตัวอย่างมีความเข้มข้นของธาตุ M มาก คลื่นแสงที่ถูกปล่อยจาก HCL จะถูกดูดกลืนไปมาก และความเข้มแสงที่วัดได้เป็นความเข้มแสงในส่วนที่ไม่ถูกดูดกลืน จะเหลืออยู่น้อย เพราะการกระจายตัวของอะตอมอิสระทั้งในสถานะพื้น และสถานะกระตุ้น เป็นไปตามสมการของโบลซ์มานน์ (Boltzmann equation) (สมการที่ 4) ความเข้มแสงในส่วนที่ไม่ถูกดูดกลืน จะผ่านมายังเครื่องแยกคลื่นแสง (monochromator) เพื่อแยกแสงให้เหลือเพียงแสงสีเดียว ซึ่งสามารถเลือกความถี่ และความยาวคลื่นเฉพาะของธาตุที่สนใจได้ เส้นสเปกตรัมของคลื่นแสงที่ส่งมายังตัวรับสัญญาณ จะถูกคำนวณ และแสดงออกมาในลักษณะความเข้มข้น โดยสามารถอธิบายหลักการทำงานของเครื่องอะตอมมิกแอปซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ดังภาพที่ 7 (นวลศรี, 2535; Ebdon *et al.*, 1998)

$$N^*/N_0 = (g^*/g_0)\exp[-(E^*-E_0)/kT] \quad (4)$$

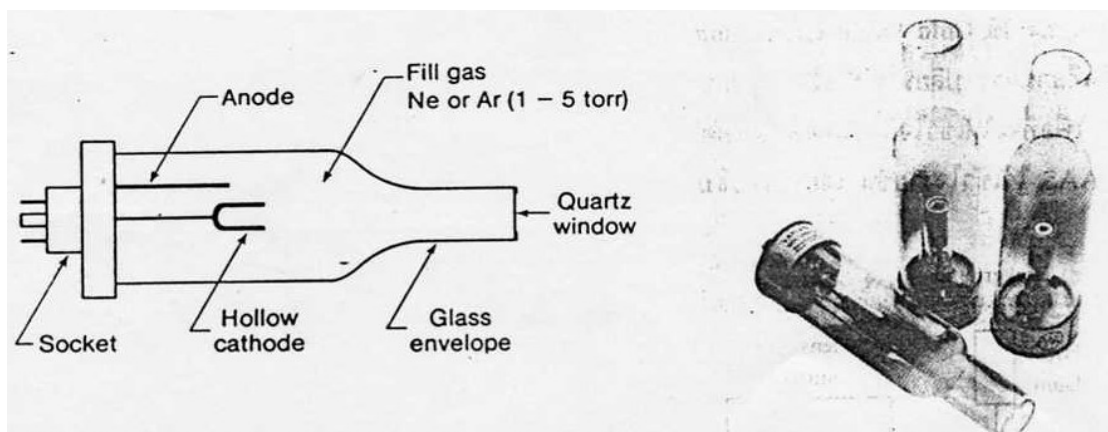
เมื่อ	N_0	คือ จำนวนอะตอมในสถานะพื้นที่มีพลังงานเป็น E_0
	N^*	คือ จำนวนอะตอมในสถานะกระตุ้นที่มีพลังงานเป็น E^*
	g^*/g_0	คือ ค่าคงที่ทางสถิติของน้ำหนักอะตอมที่ระดับสถานะกระตุ้นเทียบกับสถานะพื้น
	k	คือ ค่าคงที่ของโบลซ์มานน์ มีค่าเท่ากับ 1.381×10^{-23} จูลต่อเคลวิน (J/K)
	T	คือ อุณหภูมิในหน่วยของสเคลวิน (K)



ภาพที่ 7 หลักการทำงานของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
ที่มา: แม้น และ อมร (2539)

แหล่งกำเนิดแสง

โดยทั่วไปอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี ใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็น HCL โดยลักษณะของ HCL (ภาพที่ 8) ประกอบด้วยขั้วแคโทด ซึ่งเป็นโลหะทำเป็นรูปทรงกระบอกกลวงหรือรูปถ้วย แล้วฉาบด้วยโลหะหรือผงโลหะที่ต้องการให้ถูกกระตุ้น เพื่อให้ได้สเปกตรัมเฉพาะตัวของธาตุ และขั้วแอโนดทำด้วยโลหะ เช่น นิเกิล ทังสเตน และเซอร์โคเนียม ภายในหลอดแก้วบรรจุด้วยก๊าซนีออน หรืออาร์กอน ที่ความดันต่ำ เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 300-600 โวลต์ จะทำให้ก๊าซเฉื่อยที่บรรจุอยู่เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวก ซึ่งไอออนบวกนี้จะวิ่งไปชนธาตุที่ฉาบอยู่ที่ขั้วแคโทด ทำให้อะตอมของธาตุนั้น ๆ ถูกกระตุ้น และปล่อยคลื่นแสงออกมาเป็นสเปกตรัมเฉพาะตัวของธาตุนั้น เมื่อคลื่นแสงผ่านไปยังเปลวไฟ จะทำให้อะตอมอิสระที่อยู่ในสถานะพื้นเปลี่ยนสถานะไปสู่สถานะกระตุ้น ด้วยการดูดกลืนแสง เครื่องวิเคราะห์จะมีระบบตรวจวัดแสงอ่านและแปลงสัญญาณส่งไปยังเครื่องแสดงผลเป็นค่าความเข้มข้นของธาตุในสารละลายตัวอย่าง (นวลศรี, 2535; แม้น และ อมร, 2539; นิพนธ์ และ คณิตา, 2547; Baker and Suhr, 1982)



ภาพที่ 8 ลักษณะของ HCL

ที่มา: แม้น และ อมร (2539)

เปลวไฟ

เปลวไฟทำหน้าที่ในการทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระ ซึ่งประกอบด้วยก๊าซเชื้อเพลิง และก๊าซออกซิไดส์ สำหรับการวิเคราะห์โดยการดูดกลืนแสงของอะตอม ก๊าซเชื้อเพลิงที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป เช่น อะเซทิลีน ไฮโดรเจน และก๊าซธรรมชาติ ส่วนก๊าซออกซิไดส์ที่นิยมใช้กัน คือ อากาศ ออกซิเจน และไนโตรสออกไซด์ เปลวไฟต่างชนิดกันจะมีก๊าซเชื้อเพลิงหรือก๊าซออกซิไดส์ต่างชนิดกัน คุณลักษณะที่เห็นได้ชัดเจนของเปลวไฟแต่ละชนิด คือ อุณหภูมิ

โครงสร้างของเปลวไฟและปฏิกิริยาเคมี ที่เกิดขึ้นภายในเปลวไฟ เป็นสิ่งจำเป็นที่ควรจะทราบ เพื่อจะได้ทราบว่า ส่วนไหนของเปลวไฟที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุด และปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเปลวไฟที่มีผลต่อการวิเคราะห์ โดยแบ่งเปลวไฟเป็นขอบเขต (ภาพที่ 9) ดังนี้

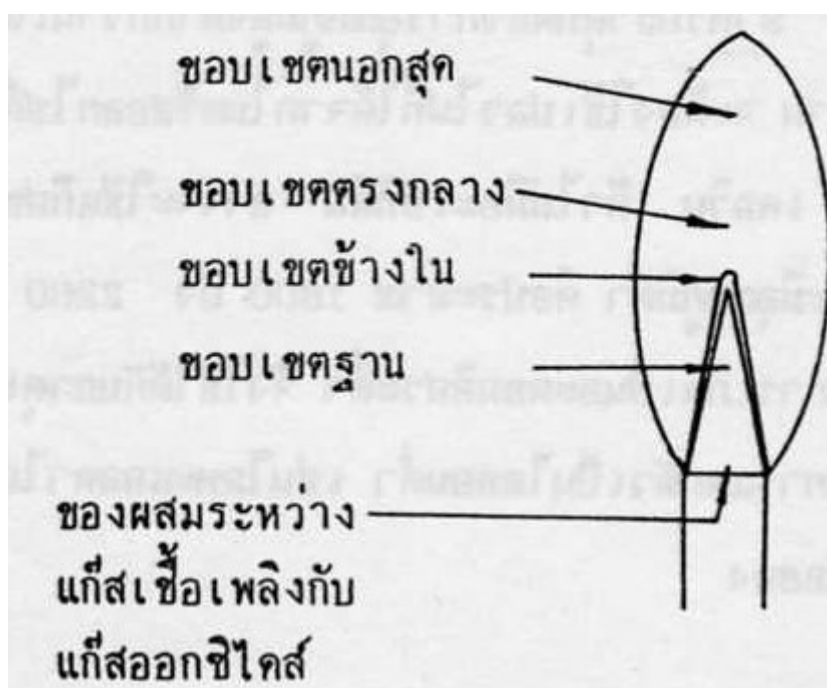
ขอบเขตฐาน เป็นฐานของเปลวไฟ มีรูปร่างเป็นกรวย ก๊าซที่ผ่านขึ้นมาจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากดูดกลืนแสงที่ปล่อยออกมาจากเปลวไฟส่วนที่เป็นขอบเขตใน

ขอบเขตใน เป็นขอบเขตที่มีรูปร่างเป็นกรวยบาง ๆ มีความหนาเพียง 0.01-0.1 มิลลิเมตร ในขอบเขตฐานนี้ ไม่สมดุลของความร้อน มีการปล่อยแสงออกมา โดยแสงที่ปล่อยออกมามีช่วงความยาวคลื่นที่กว้างมาก ปลายบนสุดของขอบเขตนี้เป็นส่วนที่ร้อนที่สุดของเปลวไฟ ความสูงของกรวยขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของการไหลของก๊าซ ซึ่งจะต้องปรับให้เหมาะสม เนื่องจากถ้าก๊าซไหลผ่าน

เร็วมากเกินไป เปลวไฟจะดับ แต่ถ้าก๊าซไหลช้าเกินไป จะเกิดการติดไฟขึ้นภายในตะเกียง ซึ่งมักตามมาด้วยการระเบิดอย่างรุนแรง โดยปกติ ไม่นิยมใช้เปลวไฟส่วนนี้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากเปลวไฟส่วนนี้อาจปล่อยแสงออกมา

ขอบเขตตรงกลาง เป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสูง เนื่องจากมีการคายความร้อนออกมา มีสมดุลของความร้อน มีการปล่อยแสงออกมาน้อยที่สุด ซึ่งเปลวไฟส่วนนี้ใช้ในการวิเคราะห์

ขอบเขตนอกสุด เป็นขอบเขตที่เกี่ยวกับขั้นตอนสุดท้ายของปฏิกิริยาการเผาไหม้ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซออกซิเจน ปกติ ขอบเขตนี้จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าขอบเขตกลาง เนื่องจากมีอากาศล้อมรอบ และไม่นิยมใช้เปลวไฟขอบเขตนี้ในการวิเคราะห์ เพราะจะมีการปล่อยแสงออกมาด้วย



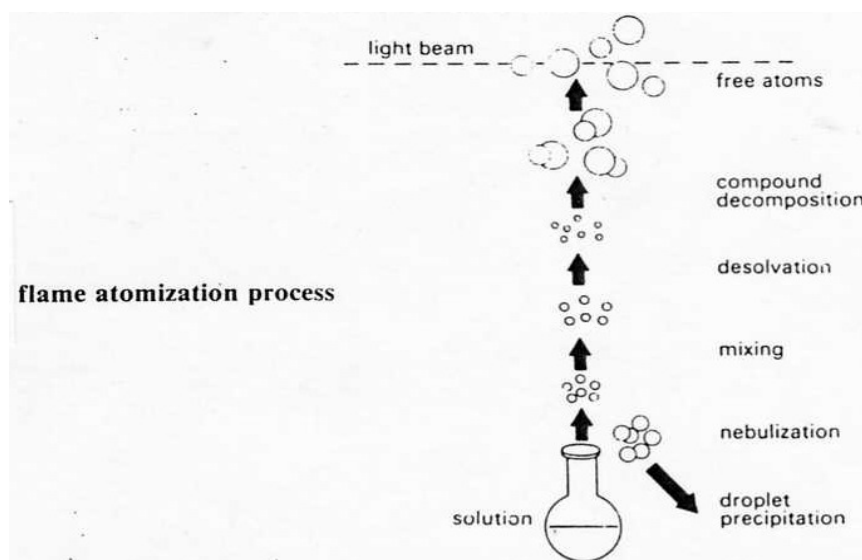
ภาพที่ 9 โครงสร้างของเปลวไฟ

ที่มา: นวลศรี (2535)

การเกิดเป็นอะตอมอิสระในเปลวไฟ

เมื่อตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์อยู่ในรูปของสารละลายแล้ว จะเข้าสู่เปลวไฟในสภาพที่เป็นละอองขนาดเล็กโดยเครื่องมือที่ชื่อว่า เนบิวไลเซอร์ (nebuliser) เมื่อก๊าซที่ช่วยให้ติดไฟ หรืออากาศที่มีความดันสูง ไหลผ่านช่องเปิดเล็กๆ ที่ปลายเนบิวไลเซอร์ ความดันของอากาศจะลดลงอย่างรวดเร็ว และพาสารละลายให้ไหลผ่านปลายท่อขนาดเล็กได้ด้วยการอัดอากาศ สารละลายที่ไหลออกมาด้วยความเร็วสูงเข้าชนกับลูกแก้วที่ปลายท่อ ลูกแก้วนี้ช่วยทำให้สารละลายกลายเป็นละอองลอย ซึ่งละอองนี้จะผสมกับก๊าซออกซิไดซ์ และก๊าซเชื้อเพลิง บางส่วนของสารผสมที่เป็นละอองลอยขนาดใหญ่ จะตกลงและไหลลงสู่ท่อระบายน้ำทิ้ง ส่วนละอองลอยที่มีขนาดเล็กพอจะผ่านตัวกรองไปยังหัวตะเกียงเข้าสู่เปลวไฟ ความร้อนจากเปลวไฟจะทำให้ตัวทำละลายระเหยออก ทำให้สารที่ต้องการวิเคราะห์แห้งกลายเป็นไอ แล้วแตกตัวเป็นอะตอมอิสระ (ภาพที่ 10)

กระบวนการเกิดอะตอมอิสระขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเปลวไฟ ความสูงของเปลวไฟเหนือช่องเปิดของตะเกียง และสภาพแวดล้อมทางเคมีของเปลวไฟ ดังนั้น สำหรับการวิเคราะห์ธาตุชนิดหนึ่ง จำเป็นต้องเลือกชนิดของเปลวไฟและความสูงของเปลวไฟเหนือช่องเปิดของตะเกียงที่เหมาะสมที่ทำให้ความไวของการวิเคราะห์ธาตุนั้นสูงสุด



ภาพที่ 10 กระบวนการทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระด้วยเปลวไฟ
ที่มา: แม้น และ อมร (2539)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. หลุมปลูกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร 2 ประจวบคีรีขันธ์ สุราษฎร์ธานี และนครสวรรค์
2. ปุ๋ยหมักจากโครงการสวนพระองค์สวนจิตรลดา
3. เครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน ของบริษัท Oxford รุ่น ED2000
4. เครื่องวิเคราะห์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ของบริษัท Perkin

Elmer รุ่น 3300

5. ตู้อบแห้ง
6. เครื่องชั่งละเอียด
7. อุปกรณ์การปลูกพืช เช่น จอบ เสียม ไม้เมตร สายวัด
8. สารเคมีที่ใช้ในการย่อยดินและพืช เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และกรด

แอมโมเนียมอะซิเตต

9. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
10. เครื่องชั่งไฟฟ้า

วิธีการ

1. การวางแผนการทดลอง

ในการศึกษาการเจริญเติบโตของแฝก 4 แหล่งพันธุ์ และอิทธิพลของปุ๋ยหมัก 3 อัตรา ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของแฝก และการดูดซึมโลหะหนักของแฝกในดินเหมืองแร่สังกะสี ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 แปลงทดลอง โดยใช้แผนการทดลองแบบ split plot design in CRD (Completely Randomized Design) มี 3 ซ้ำ มีปัจจัยที่ศึกษา 2 ปัจจัย คือ

1.1 แหล่งพันธุ์หญ้าแฝกเป็น subplot ประกอบด้วยหญ้าแฝก 4 แหล่งพันธุ์ คือ

N = แหล่งพันธุ์นครสวรรค์

K = แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร 2

P = แหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์

S = แหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี

1.2 การใส่ปุ๋ยหมักเป็น main plot ประกอบด้วย

0 = ไม่ใส่ปุ๋ยหมัก

4 = ใส่ปุ๋ยหมักในอัตรา 4 ตันต่อไร่

8 = ใส่ปุ๋ยหมักในอัตรา 8 ตันต่อไร่

โดยมีแปลงทดลอง 2 แปลง คือ แปลงทดลองที่ 1 (ภาพที่ 11) เป็นพื้นที่ลาดชัน แปลงทดลองที่ 2 (ภาพที่ 12) เป็นพื้นที่ราบ ทั้งสองแปลงอยู่ในบริเวณเหมืองแร่สังกะสี ของบริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) อำเภอแม่สวด จังหวัดตาก



ภาพที่ 11 พื้นที่ปลูกแฝกในแปลงทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นพื้นที่ลาดชัน



ภาพที่ 12 พื้นที่ปลูกแฝกในแปลงทดลองที่ 2 ซึ่งเป็นพื้นที่ราบ

2. การเตรียมการทดลอง

2.1 การเตรียมพื้นที่ในการปลูกแฝก เตรียมแปลงปลูกแฝกที่มีขนาดแปลง 8 x 27 ตารางเมตร แบ่งได้ดังนี้ คือ main plot มีขนาด 8 x 3 ตารางเมตร ทั้งหมด 9 main plot แต่ละ main plot แบ่งเป็น 4 subplot แต่ละ subplot มีขนาด 2 x 3 ตารางเมตร ในหนึ่ง subplot ทำร่องปลูกแฝก 4 ร่อง ยาวร่องละ 3 เมตร และแต่ละร่องห่างกัน 50 เซนติเมตร ใส่ปุ๋ยหมักลงใน main plot อัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ตามแผนการทดลองที่วางไว้

2.2 การปลูกแฝก เพาะพันธุ์กล้าแฝกด้วยวิธีแยกหน่อลงถุงเพาะชำ เพาะเลี้ยงให้มีอายุประมาณ 3 เดือน คัดเลือกกล้าแฝกที่มีลักษณะแข็งแรง มีขนาดต้นและจำนวนใบใกล้เคียงกัน ปลูกแฝกแต่ละแหล่งพันธุ์ลงใน subplot ตามแผนการทดลองที่วางไว้ และแต่ละ subplot ปลูกแฝก 1 แหล่งพันธุ์ จำนวน 30 ต้นต่อแถว โดยมีระยะระหว่างแถว 50 เซนติเมตร และระยะระหว่างต้น 10 เซนติเมตร ทั้งหมด 4 แถว รวม 120 ต้น คัดดินแฝกโดยให้มีความสูงจากดินประมาณ 15 เซนติเมตร ให้น้ำในแต่ละแปลงเท่ากันอย่างสม่ำเสมอ และกำจัดวัชพืชด้วยมือ

3. การเก็บข้อมูล

3.1 การเจริญเติบโตของแฟก

3.1.1 บันทึกข้อมูลความสูงของแฟก โดยสุ่มวัดต้นแฟก 2 แถวกลาง ใน subplot ที่อายุ 30, 60, 90 และ 120 วันหลังปลูกแฟก

3.1.2 บันทึกข้อมูลจำนวนต้นตอกของต้นที่สุ่มวัดความสูง เมื่อ 30, 60, 90 และ 120 วันหลังปลูกแฟก

3.1.3 บันทึกข้อมูลน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของแฟกใน subplot หลังการเก็บเกี่ยวที่ 120 วัน โดยเก็บแฟก 2 แถวด้านในที่มีพื้นที่ 1×2.6 ตารางเมตร ตัดต้นแฟก (ส่วนเหนือดิน) จำนวน 36 ตัวอย่างต่อแปลง รวมทั้งหมด 72 ตัวอย่าง ล้างด้วยน้ำสะอาด สุ่มตัวอย่างเพื่อวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้น โดยอบต้นแฟกให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส นานกว่า 48 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ จึงชั่งน้ำหนักแห้ง บันทึกน้ำหนักแห้งของต้น แล้วนำไปวิเคราะห์เพื่อหาธาตุอาหารพืช และโลหะหนักต่อไป

3.2 การวิเคราะห์ธาตุอาหารพืชและโลหะหนักในต้นแฟก โดยการบดตัวอย่างต้นแฟกให้ละเอียด เพื่อนำไปวิเคราะห์ธาตุอาหาร และโลหะหนัก ได้แก่ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total N) ด้วยวิธี Kjeldahl (Bremner, 1965) ฟอสฟอรัสทั้งหมด (total P) ด้วยวิธี wet digestion (ประพิศ, 2544) และวิเคราะห์โพแทสเซียม สังกะสี แคดเมียม และเหล็ก โดยย่อยด้วยกรดผสมไนตริกเข้มข้น (conc. HNO_3) และเปอร์คลอริกเข้มข้น (conc. HClO_4) ในอัตราส่วน 2:1 (ประภาศรี, 2544ก) แล้ววัดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี Perkin Elmer รุ่น 3300 ตามวิธีของ APHA (1993) นอกจากนี้ ได้วิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในต้นแฟก โดยการหยดสารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยวิธีตามทีกล่าวมา 0.5 มิลลิลิตร บนกระดาษกรองเบอร์ 1 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ทำให้สารละลายแห้ง แล้ววัดสเปกตรัมรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์ Oxford รุ่น ED 2000

3.3 เก็บตัวอย่างดินที่ชั้นความลึก 0-15 เซนติเมตร ก่อนการทดลองทั้ง 2 แปลง จำนวน แปลงละ 9 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 18 ตัวอย่าง ผึ่งให้แห้ง ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อ แยกส่วนที่ไม่ใช่ดินออก แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติดิน ได้แก่ ค่าพีเอชด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์ อินทรีวัตต์ในดิน โดยวิธี wet oxidation (Walkley and Black, 1934) และ สภาพการนำไฟฟ้า โดย การสกัดดินด้วยน้ำ (1:5) (มะลิวัลย์, 2544) พร้อมทั้งวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารพืชหลัก ได้แก่ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ด้วยวิธีเจลดาคัล (Kjeldahl method) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ด้วยวิธี เบร 2 (Bray II) (เกษมศรี, 2536; Olsen and Sommer, 1982) ปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ โดยวิธี แอมโมเนียมอะซิเตต (ammonium acetate method) (ประภาศรี, 2544ข) และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในดิน ได้แก่ ปริมาณสังกะสี และเหล็ก โดยวิธี DTPA (Lindsay and Norvell, 1978) ปริมาณ แคลเซียม โดยการย่อยด้วยกรดผสมไนตริกเข้มข้น (conc. HNO_3) และไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. HCl) ในอัตราส่วน 1:3 (พิชิต และ Simmons, 2544) แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโกปี ตามวิธีของ APHA (1993) นอกจากนี้ วิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในดิน โดยการหดยสารถะลายที่ได้จากการย่อยด้วยวิธีตามที่กล่าวมา 0.5 มิลลิลิตร บนกระดาดกรองเบอร์ 1 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ทำให้อายุสารถะลายแห้ง แล้ววัดสเปกตรัมรังสีเอกซ์ด้วยเครื่อง วิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์ Oxford รุ่น ED 2000

3.4 นำข้อมูลความสูง จำนวนต้นตอ กอ น้ำหนักแห้งของต้นแฝก ความเข้มข้นของโลหะหนักในต้นแฝกและดิน ความสามารถในการดูดซึมโลหะหนักของแฝก วิเคราะห์สถิติและ ตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแบบ DMRT (Duncan's Multiple Range Test) ที่ระดับความ เชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

3.5 สุ่มตัวอย่างสารถะลายที่ได้จากการย่อยดินแฝกจำนวนแปลงละ 15 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 30 ตัวอย่าง และสารถะลายที่ได้จากการย่อยดินแปลงละ 9 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 18 ตัวอย่าง หดยสารถะลายดังกล่าว 0.5 มิลลิลิตร บนกระดาดกรองเบอร์ 1 ขนาด 2.5 เซนติเมตร ทำให้อายุสารถะลายแห้ง วัดสเปกตรัมรังสีเอกซ์โดยเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์ Oxford รุ่น ED 2000 จากพีคของ Fe และ Zn วัดความเข้มของรังสี แล้วนำไปเปรียบเทียบเป็นค่าความเข้มข้นกับกราฟ เปรียบเทียบมาตรฐานของ Fe และ Zn ที่ได้อ่านค่าความเข้มของรังสี (count per sec, cps) และ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance, Abs.) ของสารถะลาย Fe มาตรฐานที่มีความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ppm) ตามลำดับ และสารถะลาย Zn มาตรฐานที่มีความเข้มข้น 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความเข้มข้น Fe

และ Zn ของตัวอย่างสารละลายที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์ และอะตอมมิ
กแอบซอร์ปชันสเปกโทรสโกปี

4. สถานที่ทำการทดลอง

1. ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพฯ
2. กลุ่มวิจัยปฐพีวิทยา สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร
กรุงเทพฯ
3. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
4. บริษัทผาแดงอินดัสทรีจำกัด (มหาชน) อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

5. ระยะเวลาทำการทดลอง

เริ่มการทดลองเดือนกันยายน 2548 จนถึงเดือนตุลาคม 2549

ผลและวิจารณ์

1. สมบัติและความอุดมสมบูรณ์ของดินก่อนการทดลอง

ในแปลงที่ 1 ดินมีพีเอช 7.56 (ตารางที่ 1) เป็นด่างเล็กน้อย (Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973) ซึ่งอาจส่งผลต่อฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน คือ ฟอสเฟต ไอออนในดินทำปฏิกิริยาก่อกันกับแคลเซียม แมกนีเซียม และคาร์บอนเนตของแคลเซียมและแมกนีเซียม ส่งผลให้ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ลดลง ในแปลงที่ 2 ดินมีพีเอช 6.1 ดินมีความเป็นกรดเล็กน้อย (Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973) ซึ่งอาจส่งผลต่อฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน เนื่องจากดินเป็นกรดทำให้มีธาตุเหล็กและอะลูมิเนียมละลายได้มาก ซึ่งธาตุเหล่านี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างฟอสเฟตกับไอออนบวกของเหล็กและอะลูมิเนียม ทำให้ฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ลดลง และสภาพกรดในดินยังส่งผลต่อธาตุโพแทสเซียม ทำให้ละลายได้ง่ายและถูกชะล้างไปในที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดินที่มีการชะล้างสูง (พื้นที่ลาดชัน) ทำให้ธาตุโพแทสเซียมไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช (ยงยุทธ, 2543; มุกดา, 2544) ค่าการนำไฟฟ้าของดินในแปลงที่ 1 และ 2 เท่ากับ 0.14 และ 0.05 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (mS/cm) ตามลำดับ แสดงว่า ดินไม่มีความเค็ม ที่ก่อให้เกิดผลเสียหายต่อพืช เนื่องจาก ดินเค็มเป็นดินที่มีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า 4 mS/cm (มะลิวัลย์, 2544) สำหรับอินทรียวตฤในดินที่วัดได้ในแปลงทดลองที่ 1 เท่ากับ 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงว่าดินมีอินทรียวตฤน้อย เพราะโดยปกติ ดินที่ดีควรมีอินทรียวตฤมากกว่า 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับอินทรียวตฤในแปลงที่ 2 เท่ากับ 2.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งถือว่าดินมีอินทรียวตฤเพียงพอ (ยงยุทธ, 2543; มุกดา, 2544)

ดินในแปลงที่ 1 และ 2 มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 1,111 และ 1,033 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับปานกลาง (Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973) ดินในแปลงที่ 1 และ 2 มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 9.2 และ 5.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งถือว่าค่อนข้างต่ำ (Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973) และหากพีเอชของดินสูงกว่า 7.2 ทำให้พืชดูดฟอสฟอรัสไปใช้ได้ยาก ซึ่งพืชอาจขาดฟอสฟอรัสได้ (ยงยุทธ, 2546) ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินทดลองแปลงที่ 1 และ 2 เท่ากับ 179.2 และ 251.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งถือว่าสูงมาก (Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973) หากพืชได้รับมากเกินไป อาจส่งผลต่อการดูดน้ำแคลเซียม และแมกนีเซียมของพืชได้ (ยงยุทธ, 2546)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในดิน ได้แก่ สังกะสี แคดเมียม และเหล็ก ในแปลงทดลองที่ 1 มีค่าเท่ากับ 279.1, 1.3 และ 42,327 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และในแปลงทดลองที่ 2 เท่ากับ 213.6, 1.2 และ 15,602 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่าที่ใช้ประเมินความเสี่ยงของการปนเปื้อนสังกะสี และแคดเมียม ที่กำหนดไว้ที่ 71 และ 0.074 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (พิชิต และ สุรสิทธิ์, 2542) และความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (US.EPA., 1983; Pendias, 1992, 2001)

ตารางที่ 1 สมบัติทางเคมี ความเข้มข้นของธาตุอาหารพืช และโลหะหนัก ของดินเหมืองแร่สังกะสี บริษัทผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ที่ทดลองปลูกแฟก

แปลงทดลอง	สมบัติทางเคมี			ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					
	pH	EC (mS/cm) ¹	OM (%) ²	ธาตุอาหารพืช ³			โลหะหนัก ⁴		
				N	P	K	Zn	Cd	Fe
1	7.6	0.14	0.8	1,111	9.2	179.2	279.2	1.3	42,327
2	6.1	0.05	2.3	1,033	5.0	251.7	213.7	1.2	15,602

¹ ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่สกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

² เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอินทรีย์วัตถุในดิน

³ N = ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด โดยวิธีเคดาห์ล

P = ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โดยวิธีเบอร์ 2

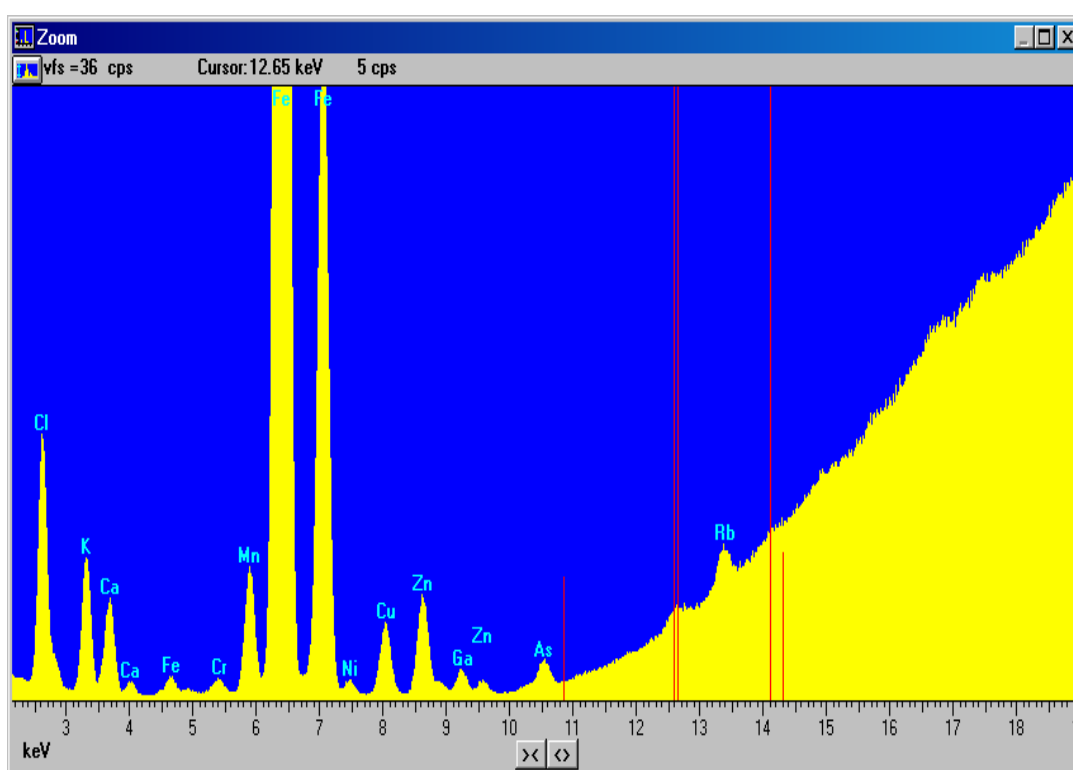
K = ปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ โดยวิธีแอมโมเนียมอะซิเตด

⁴ ปริมาณทั้งหมด โดยการย่อยด้วยกรดผสมไนตริกเข้มข้นและไฮโดรคลอริกเข้มข้น

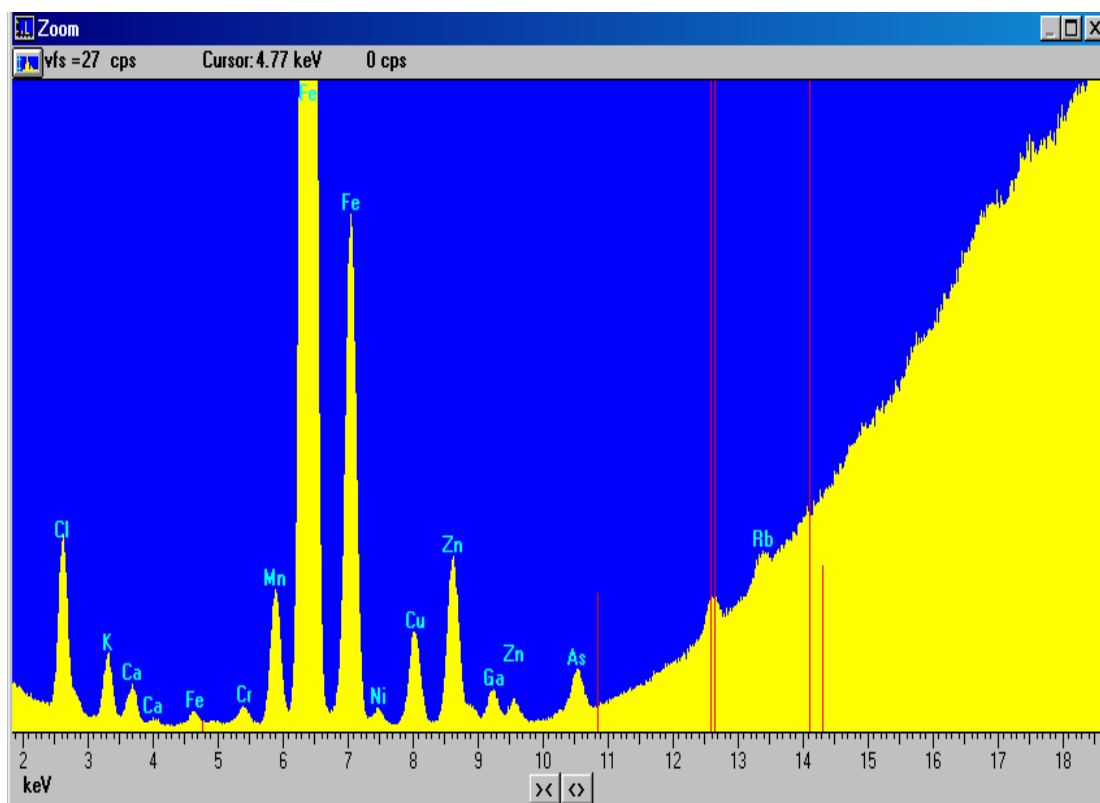
จากข้อมูลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ดินที่ใช้ในการทดลอง ถึงแม้จะมีธาตุไนโตรเจนเพียงพอต่อความต้องการของพืช แต่ธาตุฟอสฟอรัสต่ำ และธาตุโพแทสเซียมมีค่าสูงมากจนอาจเป็นพิษต่อพืช อีกทั้ง ยังมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก ได้แก่ สังกะสี แคดเมียม และเหล็กในดินสูง ซึ่งอาจมีผลเสียต่อการเจริญเติบโตของพืชได้

2. ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในดิน

ได้วิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในดิน โดยการย่อยดินด้วยกรดจนได้สารละลายใส แล้วหยดบนกระดาษกรอง และวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์ พบว่า ดินในแปลงทดลองที่ 1 และ 2 มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบ เช่น แคลเซียม (Ca) แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) คลอรีน (Cl) และ แบเรียม (Ba) โพแทสเซียม (K) ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) แกดอลิเมียม (Ga) อาร์เซนิก (As) และรูบิเดียม (Rb) (ภาพที่ 13 และ 14 ตามลำดับ)



ภาพที่ 13 สเปกตรัมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในดินที่ปลูกแฝกในแปลงทดลองที่ 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์



ภาพที่ 14 สเปกตรัมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในดินที่ปลูกแฟกในแปลงทดลองที่ 2 ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์

จากข้อมูลดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ที่สามารถวิเคราะห์ธาตุอาหารพืชในดิน ได้แก่ โพแทสเซียม แคลเซียม เหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และคลอรีน ส่วนธาตุอาหารพืชอื่นไม่ปรากฏพิกให้เห็น ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์ มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น การเกิดอันตรกิริยาระหว่างธาตุ และผลทางกายภาพ (แม้น และ อมร, 2539; สัมพันธ์, 2541; Whiston, 1991) หรือจากการที่เครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ตั้งแต่ธาตุโซเดียม (Na) หรือธาตุที่มีเลขเชิงอะตอมตั้งแต่ 11 ขึ้นไป (สัมพันธ์, 2541) ดังนั้น ธาตุอาหารพืชในดิน ได้แก่ ไนโตรเจน และโบรอน ที่มีเลขเชิงอะตอมต่ำกว่าโซเดียม จึงไม่สามารถวิเคราะห์ได้ ส่วนธาตุกำมะถัน แมกนีเซียม และโมลิบดีนัม ไม่ปรากฏพิกให้เห็น อาจมาจากความเข้มข้นของธาตุนี้น้อย จึงอาจส่งผลให้ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ (แม้น และ อมร, 2539) ส่วนธาตุฟอสฟอรัส ที่ไม่ปรากฏพิกนั้น อาจมาจากเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมสาร หากการเตรียมสารตัวอย่างไม่ดีพอ อาจทำให้เกิดผลทางกายภาพ เช่น การกระเจิงของรังสีเอกซ์แตกต่าง

กัน จึงอาจส่งผลต่อการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ ทำให้ไม่สามารถแยกความแตกต่างของพลังงานรังสีเอกซ์ได้ (แม่น และ อมร, 2539)

ผลการทดลองในแปลงทดลองที่ 1

1. การเจริญเติบโตของแฟก

1.1 ความสูงของแฟก

การเจริญเติบโตด้านความสูงของแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 นครสวรรค์ ประจวบคีรีขันธ์ และสุราษฎร์ธานี ในแปลงทดลองที่ 1 แสดงในตารางที่ 2 ที่ 30, 60 และ 90 วัน หลังปลูก แฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 และนครสวรรค์ มีความสูงไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่สูงกว่าแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ และสุราษฎร์ธานี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนที่ 120 วันหลังปลูก แฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีความสูงมากที่สุด และมากกว่าแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี นครสวรรค์ และประจวบคีรีขันธ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยความสูงที่ 120 วัน ของแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 สุราษฎร์ธานี นครสวรรค์ และประจวบคีรีขันธ์ เท่ากับ 123.7, 101.9, 95.5 และ 86.4 เซนติเมตร ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปุ๋ยหมักที่มีต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงของแฟกนั้น พบว่า หลังปลูกแฟก 30 วัน แฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ มีความสูงเฉลี่ยมากที่สุด (ตารางที่ 2) แตกต่างกับแฟกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่แตกต่างกันกับแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ โดยค่าเฉลี่ยความสูงของแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8, 4 และ 0 ตันต่อไร่ เท่ากับ 38.5, 34.4 และ 31.9 เซนติเมตร ตามลำดับ ที่ 60 แฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ มีความสูงเฉลี่ยมากที่สุด และมากกว่าแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 และ 0 ตันต่อไร่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนที่ 90 และ 120 วันหลังปลูก แฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ มีความสูงเฉลี่ยมากที่สุด ไม่แตกต่างกันกับแฟกที่ใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ แต่มากกว่าแฟกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก (0 ตันต่อไร่) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยความสูงที่ 120 วันของแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8, 4 และ 0 ตันต่อไร่ เท่ากับ 111.8, 106.3 และ 87.5 เซนติเมตร ตามลำดับ

จากข้อมูล แสดงให้เห็นว่า แผลแต่ละแหล่งพันธุ์มีความสามารถเจริญเติบโตด้านความสูงได้แตกต่างกัน โดยแผลแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 เจริญเติบโตด้านความสูงได้มากที่สุด และมากกว่าแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของธนิยา (2539) ที่ได้ทำการทดลองปลูกแผลในดินที่รดด้วยน้ำเสียอุตสาหกรรม พบว่า แผลแต่ละแหล่งพันธุ์มีความสูงแตกต่างกัน เช่นเดียวกับสุทธิรักษ์ และคณะ (2549) ที่ทำการทดลองปลูกแผลในน้ำเสียอุตสาหกรรม พบว่า แผลแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีความสูงมากกว่าสุราษฎร์ธานี ส่วนแผลที่ได้รับปุ๋ยหมักมีการเจริญเติบโตด้านความสูงดีกว่าแผลที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก

1.2 การแตกกอของแผล

เมื่อพิจารณาการแตกกอของแผลทั้ง 4 แหล่งพันธุ์ พบว่า ที่ 30 วันหลังปลูก แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีการแตกกอสูงสุด (ตารางที่ 3) ไม่แตกต่างกันกับแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี แต่มากกว่าแหล่งพันธุ์นครสวรรค์กับประจวบคีรีขันธ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ 60 วันหลังปลูก แผลแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีการแตกกอสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ แต่มากกว่าสุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ 90 วันหลังปลูก แหล่งพันธุ์นครสวรรค์มีการแตกกอสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ และกำแพงเพชร-2 แต่มากกว่าแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนที่ 120 วันหลังปลูก การแตกกอของแผลแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์สูงสุด และมากกว่าสุราษฎร์ธานี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่แตกต่างกันกับแผลแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ และกำแพงเพชร-2 โดยมีจำนวนต้นต่อกอเฉลี่ยที่ 120 วัน ของแผลแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ นครสวรรค์ กำแพงเพชร-2 และสุราษฎร์ธานี เท่ากับ 13.4, 12.4, 8.4 และ 6.1 ต้นต่อกอ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการอิทธิพลของปุ๋ยหมักต่อการแตกกอของแผล พบว่า ที่ 30 วันหลังปลูก แผลที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8, 4 และ 0 ต้นต่อไร่ มีการแตกกอไม่แตกต่างกัน ที่ 60 วันหลังปลูก แผลที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ต้นต่อไร่ มีการแตกกอสูงสุด แตกต่างกับแผลที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 และ 0 ต้นต่อไร่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ 90 วันหลังปลูก แผลที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ต้นต่อไร่ มีการแตกกอสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแผลที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ต้นต่อไร่ แต่มากกว่าแผลที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 0 ต้นต่อไร่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และที่ 120 วันหลังปลูก แผลที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8, 4 และ 0 ต้นต่อไร่ มีการแตกกอไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าเฉลี่ยจำนวนต้นต่อกอของแผลที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8, 4 และ 0 ต้นต่อไร่ เท่ากับ 11.6, 11.8 และ 7.0 ต้นต่อกอ ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ความสูงของแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 30, 60, 90 และ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 1

อายุแฟก (วัน)	แฟก แหล่งพันธุ์	ความสูงของแฟก (เซนติเมตร) ¹ เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา (ตัน/ไร่)			เฉลี่ย
		0	4	8	
30	K	40.0a	44.2a	50.9a	45.0a
	N	39.1a	40.8a	44.2ab	41.4a
	P	24.7b	26.0b	35.9bc	28.9b
	S	23.8b	26.6b	23.1c	24.5b
เฉลี่ย ²		31.9b	34.4ab	38.5a	-
60	K	51.6a	65.8a	70.6a	64.7a
	N	60.8a	63.5a	69.8a	64.7a
	P	42.8b	45.2b	53.3b	47.1b
	S	40.3b	46.3b	41.5b	42.7b
เฉลี่ย ²		50.4c	55.2b	58.8a	-
90	K	82.1a	98.1a	105.1a	95.1a
	N	70.8ab	91.6a	92.6ab	85.0a
	P	54.8b	63.0b	73.0b	63.6b
	S	59.8b	75.6ab	76.4b	70.6b
เฉลี่ย ²		66.9b	82.1a	86.8a	-
120	K	106.2a	133.6a	131.3a	123.7a
	N	81.6ab	103.6a	101.2b	95.5b
	P	70.5b	91.5b	97.2b	86.4b
	S	91.8ab	96.5b	117.5ab	101.9b
เฉลี่ย ²		87.5b	106.3a	111.8a	-

¹ ตัวเลขในแนวนอนที่วัดในวันเดียวกัน และกำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

² ตัวเลขในแนวเดียวกัน ที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ตารางที่ 3 การแตกกอของแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 30, 60, 90 และ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 1

อายุแฟก (วัน)	แฟก แหล่งพันธุ์	การแตกกอของแฟก (ต้นตอก) ¹ เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา (ตัน/ไร่)			เฉลี่ย
		0	4	8	
30	K	1.5ab	1.9a	1.6a	1.7a
	N	1.3b	1.4b	1.4a	1.4b
	P	1.2b	1.2b	1.5a	1.3b
	S	1.7a	1.6ab	1.5a	1.6a
เฉลี่ย ²		1.4a	1.5a	1.5a	-
60	K	2.0a	3.0a	3.0a	2.7a
	N	2.0a	2.0b	3.3a	2.4a
	P	1.0b	1.7b	2.0b	1.6c
	S	2.0a	2.0b	1.9b	2.0b
เฉลี่ย ²		1.8c	2.2b	2.6a	-
90	K	4.7a	6.7a	8.0a	6.4a
	N	5.3a	7.7a	10.0a	7.7a
	P	4.0ab	8.3a	9.7a	7.3a
	S	2.3b	2.2b	2.2b	2.3b
เฉลี่ย ²		4.1b	6.2a	7.5a	-
120	K	6.7a	9.7a	9.0a	8.4ab
	N	8.0a	16.0a	13.3a	12.4a
	P	9.0a	14.7a	16.7a	13.4a
	S	4.3b	6.7a	7.3a	6.1b
เฉลี่ย ²		7.0a	11.8a	11.6a	-

¹ ตัวเลขในแนวตั้งที่วัดในวันเดียวกัน และกำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

² ตัวเลขในแนวเดียวกัน ที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จากข้อมูล เมื่อเปรียบเทียบการแตกกอของแฝกแต่ละแหล่งพันธุ์ จะเห็นได้ว่า แฝกแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ มีการแตกกอสูงสุด (ตารางที่ 3) ทั้งนี้ แหล่งพันธุ์แฝกมีอิทธิพลต่อการแตกกอของแฝก ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของสรัดนา (2548) ที่ทำการทดลองปลูกแฝกในดินปนเปื้อนโลหะหนัก ได้รายงานไว้ว่า แหล่งพันธุ์แฝกเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกกอของแฝกที่ทำให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนการใส่ปุ๋ยหมัก ถึงแม้ตัวเลขทางสถิติจะไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 3) แต่จะเห็นได้ว่า เมื่อแฝกมีอายุมากขึ้น จะมีการแตกกอเพิ่มขึ้น และการใส่ปุ๋ยหมักทำให้แฝกมีการแตกกอได้มากขึ้นด้วย

1.3 น้ำหนักแห้งของต้นแฝก

เมื่อเก็บเกี่ยวแฝกที่ 120 วันหลังปลูก แล้วบันทึกข้อมูลด้านน้ำหนักแห้งของต้นแฝก พบว่า แฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 ให้น้ำหนักแห้งเฉลี่ยสูงสุด แตกต่างกับแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4) โดยมีน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของแฝก เท่ากับ 382.4, 151.3, 126.4 และ 79.2 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ และแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ ให้น้ำหนักแห้งเฉลี่ยสูงสุด 260.7 กิโลกรัมต่อไร่ แต่ไม่แตกต่างกันกับแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ ที่ให้น้ำหนักแห้งเฉลี่ย 194.9 กิโลกรัมต่อไร่ โดยแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก ให้น้ำหนักแห้งเฉลี่ย 99.2 กิโลกรัมต่อไร่ ต่ำกว่าแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากข้อมูลการเจริญเติบโตด้านความสูง การแตกกอ และน้ำหนักแห้งของแฝก แสดงให้เห็นว่า แฝกสามารถเจริญเติบโตได้ในดินเหมืองแร่สังกะสีได้ดี และแฝกแต่ละแหล่งพันธุ์มีความสูง การแตกกอ และน้ำหนักแห้งแตกต่างกัน โดยแฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีการเจริญเติบโตในด้านความสูงและน้ำหนักแห้งได้ดีที่สุด ขณะที่แฝกแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ มีการแตกกอสูงสุด ส่วนการใส่ปุ๋ยหมัก แม้จะไม่ส่งผลต่อการแตกกอของต้นแฝกอย่างชัดเจน แต่ก็ช่วยในการเจริญเติบโตด้านความสูง และน้ำหนักแห้ง โดยแฝกที่ได้รับปุ๋ยอัตรา 8 ตันต่อไร่ ให้ความสูงและน้ำหนักแห้งสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ แต่มากกว่าแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้น ในทางปฏิบัติของการปลูกแฝก อาจใส่ปุ๋ยหมักในอัตรา 4 ตันต่อไร่ ซึ่งเป็นอัตราที่แนะนำโดยกรมพัฒนาที่ดิน (2541ข) เพื่อช่วยเพิ่มความสูง และน้ำหนักแห้งให้แฝก เป็นการส่งเสริมในด้านการเจริญเติบโตได้ทางหนึ่งที่ทำให้ผลไม่แตกต่างจากการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ และเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย นอกจากนี้ ยังเป็นการเพิ่ม

อินทรีย์วัตถุในดิน ให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช (ทิพวรรณ, 2547; กรมวิชาการเกษตร, 2548; ปฐพีชล, 2548)

ตารางที่ 4 น้ำหนักแห้งของดินแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 1

แฟก แหล่งพันธุ์	น้ำหนักแห้งของดินแฟก (กิโลกรัมต่อไร่) ¹			เฉลี่ย
	เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา (ตัน/ไร่)			
	0	4	8	
K	199.4a	384.7a	263.2a	382.4a
N	74.6b	185.6b	201.0b	151.3b
P	49.1b	85.1b	103.5b	79.2c
S	73.6b	131.4b	174.5b	126.4bc
เฉลี่ย ²	99.2b	194.9ab	260.7a	-

¹ ตัวเลขในแนวตั้งเดียวกัน และกำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

² ตัวเลขในแนวนอนเดียวกัน ที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2. ปริมาณธาตุอาหารหลักของพืชในดินแฟก (ส่วนเหนือดิน)

2.1 ความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชในดินแฟก

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ในดินแฟก แสดงให้เห็นว่า แฟกทั้ง 4 แหล่งพันธุ์ มีความเข้มข้นของไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ไม่แตกต่างกัน โดยแหล่งพันธุ์นครสวรรค์มีความเข้มข้นเฉลี่ยของไนโตรเจน (9.5 กรัมต่อกิโลกรัม) และฟอสฟอรัส (1.5 กรัมต่อกิโลกรัม) ในดินสูงสุด (ตารางที่ 5) ในขณะที่แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มี

ความเข้มข้นเฉลี่ยของโพแทสเซียมสูงสุด (9.4 กรัมต่อกิโลกรัม) ไม่แตกต่างกันกับแหล่งพันธุ์ ประจวบคีรีขันธ์ และสุราษฎร์ธานี แต่มากกว่านครสวรรค์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ปุ๋ยหมักไม่มีผลต่อความเข้มข้นของไนโตรเจน และโพแทสเซียมในต้นแฝก โดยแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก มีความเข้มข้นเฉลี่ยของไนโตรเจน และโพแทสเซียมสูงสุด คือ 10.0 และ 9.0 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 5) แฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ต้นต่อไร่ มีความเข้มข้นเฉลี่ยของฟอสฟอรัสสูงสุด และมากกว่าแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 และ 0 ต้นต่อไร่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในต้นแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8, 4 และ 0 ต้นต่อไร่ เท่ากับ 1.7, 1.6 และ 1.0 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ข้อมูลในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ต้นแฝกมีความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม อยู่ในช่วง 7.7-9.5, 1.3 -1.5 และ 7.7 -9.3 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยแฝกแหล่งพันธุ์นครสวรรค์มีความเข้มข้นของไนโตรเจน และฟอสฟอรัสสูงสุด ขณะที่แฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมสูงสุด ทำนองเดียวกันกับสุทธิรักษ์ (2548) ได้รายงานไว้ว่า แฝกมีความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในต้น อยู่ในช่วง 4.9-56.8, 2.1-2.3 และ 11.7-12.7 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และระดับไนโตรเจนที่คาดว่าเพียงพอสำหรับพืชทั่วไป เท่ากับ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยน้ำหนักแห้งของพืช นั่นคือแฝกได้รับไนโตรเจนอย่างเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช (ขงยุทธ, 2546) ส่วนการใส่ปุ๋ยหมัก แม้ไม่มีผลต่อความเข้มข้นของไนโตรเจน และโพแทสเซียม แต่ส่งเสริมฟอสฟอรัสในต้นแฝกให้มีความเข้มข้นมากกว่าแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และจะเห็นได้ว่า แฝกได้รับไนโตรเจน และโพแทสเซียมเพียงพอต่อความต้องการของพืช ในขณะที่ ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในต้นแฝกน้อยกว่า 2.0 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมาก โดยความต้องการฟอสฟอรัสของพืชทั่วไปอยู่ที่ระดับ 3,000-5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยน้ำหนักแห้งของพืช เพื่อให้การเจริญเติบโตเป็นไปตามปกติ (ขงยุทธ, 2546) ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากค่าพีเอชของดินที่เป็นด่าง ซึ่งอาจส่งผลให้ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดินลดลง เนื่องจากฟอสเฟตไอออนในดินทำปฏิกิริยากดตะกอนกับแคลเซียม แมกนีเซียม และคาร์บอนเนตของแคลเซียมและแมกนีเซียม ทำให้พืชดูดไปใช้ได้ยาก (มุกดา, 2544; ขงยุทธ, 2546)

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของธาตุอาหารพืช (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม) ในแฟก
แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี
(S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 1

ธาตุ อาหารพืช	แฟก แหล่งพันธุ์	ความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชในดินแฟก (กรัมต่อกิโลกรัม) ¹ เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา (ตัน/ไร่)			เฉลี่ย
		0	4	8	
ไนโตรเจน	K	8.7b	7.3a	7.1a	7.7a
	N	12.4a	9.0a	7.3a	9.5a
	P	10.1ab	7.9a	7.4a	8.5a
	S	9.2b	7.7a	7.9a	8.3a
เฉลี่ย ²		10.1a	7.9a	7.4a	-
ฟอสฟอรัส	K	1.0a	1.5a	1.6ab	1.4a
	N	1.1a	1.5a	2.0a	1.5a
	P	1.0a	1.6a	1.4b	1.3a
	S	1.0a	1.7a	1.9a	1.5a
เฉลี่ย ²		1.0b	1.6a	1.7a	-
โพแทสเซียม	K	9.7a	9.4a	9.0a	9.4a
	N	7.3b	7.6a	8.1a	7.7b
	P	10.1a	8.8a	9.1a	9.3a
	S	8.8ab	8.4a	8.7a	8.6ab
เฉลี่ย ²		9.0a	8.6a	8.7a	-

¹ ตัวเลขในแนวดังเดียวกัน และกำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

² ตัวเลขในแนวนอนเดียวกัน ที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดย
วิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2.2 ปริมาณธาตุอาหารพืชที่แฝกสามารถดูดซึมไว้ในดินแฝก

ปริมาณไนโตรเจนในแฝกแต่ละแหล่งพันธุ์ในตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่า แฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยในดินสูงสุด และมากกว่าแฝกแหล่งพันธุ์อื่น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีปริมาณไนโตรเจนในแฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ เท่ากับ 2,897, 1,309, 999 และ 682 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ

ปริมาณฟอสฟอรัสในดินแฝก แสดงให้เห็นว่า แฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 สูงสุด แตกต่างกับแฝกแหล่งพันธุ์อื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 6) โดยมีค่าเฉลี่ยของปริมาณฟอสฟอรัสในแฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ เท่ากับ 545, 250, 207 และ 117 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ

ปริมาณโพแทสเซียมในแฝกแต่ละแหล่งพันธุ์ แสดงให้เห็นว่า แฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีปริมาณโพแทสเซียมในดินสูงสุด และมากกว่าแฝกแหล่งพันธุ์อื่น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 6) โดยมีค่าเฉลี่ยของปริมาณโพแทสเซียมในแฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ เท่ากับ 2,355, 1,193, 1,089 และ 787 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปุ๋ยหมักจากข้อมูลในตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่า แฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ มีปริมาณไนโตรเจนในดินแฝกสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ แต่มากกว่าแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก (0 ตันต่อไร่) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนในแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8, 4 และ 0 ตันต่อไร่ เท่ากับ 1,888, 1,564 และ 963 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ ขณะที่แฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ มีปริมาณฟอสฟอรัสในดินแฝกสูงสุด และมากกว่าแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ และแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยของปริมาณฟอสฟอรัสในแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8, 4 และ 0 ตันต่อไร่ เท่ากับ 439, 301, 99 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ และแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ มีปริมาณเฉลี่ยของโพแทสเซียมในดินสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ แต่มากกว่าแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยของปริมาณโพแทสเซียมในแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8, 4 และ 0 ตันต่อไร่ เท่ากับ 2,291, 1,732 และ 913 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ

จากข้อมูลในตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่า แผลแต่ละแหล่งพันธุ์มีความสามารถในการดูดซึมธาตุอาหารพืชได้แตกต่างกัน โดยแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 สามารถดูดซึมธาตุอาหารพืชไปสะสมในต้นได้สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของสุทธิรักษ์ (2548) ได้รายงานไว้ว่า แผลแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีค่าเฉลี่ยไนโตรเจนในต้นสูงสุด โดยแผลแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 สามารถดูดซึมไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมไว้ในต้น เท่ากับ 2,897, 545 และ 2,355 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า แผลดูดซึมโพแทสเซียมได้สูงสุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโพแทสเซียม เป็นธาตุอาหารที่เคลื่อนย้ายได้ง่าย จึงทำให้ปริมาณธาตุนี้มีในพืชมากกว่าธาตุอาหารพืชอื่น (ยงยุทธ, 2546) นอกจากนี้ พืชที่ได้รับโพแทสเซียมในปริมาณที่เพียงพอจะช่วยให้พืชทนแล้งได้ดี (Marchner, 1995) ส่วนการใส่ปุ๋ยหมักช่วยทำให้แผลสามารถดูดซึมธาตุอาหารมาสะสมไว้ในต้นได้ดี ทั้งนี้เนื่องจากปุ๋ยหมักช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของแผล โดยทำให้ความสูง และน้ำหนักแห้งของแผลเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3 และ 4)

3. ปริมาณโลหะหนักในต้นแผล

3.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักในต้นแผล

ข้อมูลจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นโลหะหนักในต้นแผล ได้แก่ สังกะสี แคดเมียม และเหล็กโดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี แสดงให้เห็นว่า แผลแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีความเข้มข้นเฉลี่ยของสังกะสีในต้นสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ และประจวบคีรีขันธ์ แต่มากกว่าแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 7) โดยมีความเข้มข้นเฉลี่ยของสังกะสีในต้นแผล เท่ากับ 45.9, 44.3, 41.0 และ 25.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

แผลแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ มีความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมสูงสุด (1.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ไม่แตกต่างกันกับแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ (1.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) แต่มากกว่าแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (1.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และสุราษฎร์ธานี (0.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 7)

ความเข้มข้นของเหล็กในดินแฟกแต่ละแหล่งพันธุ์ แสดงให้เห็นว่า แฟกแหล่งพันธุ์ ประจวบคีรีขันธ์ มีความเข้มข้นเฉลี่ยของเหล็กสูงสุด (264.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ไม่แตกต่างกัน กับแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ (261.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และสุราษฎร์ธานี (200.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) แต่มากกว่าแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (169.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 7)

ปุ๋ยหมักไม่มีผลต่อความเข้มข้นของสังกะสี แคลเซียม และเหล็กในดินแฟก (ตารางที่ 7) แต่อย่างไรก็ตาม ปุ๋ยหมักส่งเสริมด้านการเจริญเติบโตของแฟก เพราะปุ๋ยหมักช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน ช่วยให้ดินร่วนซุย และอุ้มน้ำได้ดี (กรมวิชาการเกษตร, 2548)

จากข้อมูลความเข้มข้นของโลหะหนักในดินแฟก แสดงให้เห็นว่า แฟกแหล่งพันธุ์ ประจวบคีรีขันธ์มีความเข้มข้นของแคลเซียม และเหล็กสูงสุด ขณะที่แฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีความเข้มข้นของสังกะสีสูงสุด แต่มีความเข้มข้นของเหล็กต่ำสุด ทั้งนี้ เนื่องจากธาตุสังกะสีและเหล็ก เป็นปฏิกิริยาต่อกัน คือ ถ้าพืชมีความเข้มข้นของสังกะสีสูง ความเข้มข้นของเหล็กต่ำ ในทำนองเดียวกัน หากพืชมีความเข้มข้นของสังกะสีต่ำ ก็อาจจะมีมีความเข้มข้นของเหล็กสูง (ยงยุทธ, 2546; Pendias, 1992, 2001) แม้ว่า แฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 จะมีความเข้มข้นของแคลเซียม และเหล็กในดินต่ำ แต่หากพิจารณาการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งร่วมด้วย ก็มีแนวโน้มในการดูดซึมโลหะหนักได้สูงกว่าแหล่งพันธุ์อื่น การใส่ปุ๋ยหมักก็เช่นเดียวกัน แม้ไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของโลหะหนักในดินแฟก แต่ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโต ช่วยส่งเสริมการดูดซึมโลหะหนักในดินแฟก ก็จะทำให้ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดินแฟกมีสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 6 ปริมาณของธาตุอาหารพืช (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม) ในแฟก
แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี
(S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 1

ธาตุ อาหารพืช	แฟก แหล่งพันธุ์	ปริมาณของธาตุอาหารพืชในต้นแฟก (กรัมต่อไร่) ¹			เฉลี่ย
		เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา (ตัน/ไร่)			
		0	4	8	
ไนโตรเจน	K	1,772a	2,850a	4,069a	2,897a
	N	907a	1,612b	1,409b	1,309b
	P	501b	794b	752b	682b
	S	671a	1,002b	1,323b	999b
เฉลี่ย ²		963b	1,564ab	1,888a	-
ฟอสฟอรัส	K	191a	557a	888a	545a
	N	86a	261b	405b	250b
	P	47a	164b	139c	117c
	S	73a	224b	325b	207bc
เฉลี่ย ²		99c	301b	439a	-
โพแทสเซียม	K	1,960a	3,514a	5,060a	2,355a
	N	543b	1,380b	1,657b	1,193b
	P	498b	925b	937b	787b
	S	649b	1,107b	1,509b	1,089b
เฉลี่ย ²		913b	1,732a	2,291a	-

¹ ตัวเลขในแนวดังเดียวกัน และกำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

² ตัวเลขในแนวนอนเดียวกัน ที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดย
วิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

3.2 ปริมาณโลหะหนักที่แฟกสามารถดูดซึมไว้ในดินแฟก

ปริมาณสังกะสีทั้งหมดที่แฟกสามารถดูดซึมได้ แสดงให้เห็นว่า แฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีปริมาณสังกะสีและแคดเมียมเฉลี่ยในดินแฟกสูงสุด และมากกว่าแหล่งพันธุ์อื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 8) โดยแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีปริมาณสังกะสีและแคดเมียมเฉลี่ยในดิน เท่ากับ 13.3 และ 0.4 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ

ปริมาณเหล็กทั้งหมดในดินแฟก แสดงให้เห็นว่า แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีปริมาณเหล็กเฉลี่ยในดินสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ แต่มากกว่าแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ และสุราษฎร์ธานี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 8) โดยมีปริมาณเฉลี่ยของเหล็กในดินแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 นครสวรรค์ ประจวบคีรีขันธ์ และสุราษฎร์ธานี เท่ากับ 63.7, 47.8, 23.3 และ 22.9 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับสุทธิรักษ์ และคณะ (2549) ได้รายงานไว้ว่า แฟกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีดูดซึมเหล็กไว้ได้ในส่วนของลำต้นและใบแฟกได้ดีที่สุด

สำหรับอิทธิพลของปุ๋ยหมักจากข้อมูลในตารางที่ 8 แสดงให้เห็นว่า แฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ มีปริมาณเฉลี่ยของสังกะสีสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ แต่มากกว่าแฟกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่แฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ มีปริมาณเฉลี่ยของแคดเมียมและเหล็กสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ และมากกว่าแฟกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จะเห็นได้ว่า ปุ๋ยหมักส่งผลต่อการดูดซึมโลหะหนักของแฟก

จากข้อมูลปริมาณทั้งหมดของโลหะหนักในดินแฟก แสดงให้เห็นว่า แฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีความสามารถในการดูดซึมสังกะสี แคดเมียม และเหล็กได้ดีที่สุด โดยมีปริมาณเฉลี่ยของสังกะสี แคดเมียม และเหล็กในดิน เท่ากับ 13.3, 0.4 และ 63.7 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ ขณะที่แฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักสามารถดูดซึมโลหะหนักได้ดีกว่าแฟกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก และการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 4 และ 8 ตันต่อไร่ ให้ผลได้แตกต่างจากแฟกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก (0 ตันต่อไร่)

ตารางที่ 7 ความเข้มข้นของโลหะหนัก (Zn, Cd และ Fe) ในดินแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 1

โลหะหนัก	แฟก แหล่งพันธุ์	ความเข้มข้นของโลหะหนักในดินแฟก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ¹ เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา (ตัน/ไร่)			เฉลี่ย
		0	4	8	
Zn	K	66.9a	45.1a	25.6a	45.9a
	N	48.7ab	53.4a	30.8a	44.3a
	P	41.8ab	31.5a	49.7a	41.0ab
	S	25.8b	20.8a	28.9a	25.2b
เฉลี่ย ²		45.8a	37.7a	33.8a	-
Cd	K	1.0ab	1.0ab	0.9b	1.0b
	N	1.1ab	1.4a	1.1ab	1.2ab
	P	1.2a	1.3a	1.3a	1.3a
	S	0.6b	0.8b	0.9b	0.8c
เฉลี่ย ²		1.0a	1.1a	1.0a	-
Fe	K	148.8b	136.7a	222.4a	169.3b
	N	317.8a	223.3a	242.0a	261.0a
	P	323.5a	212.1a	258.1a	264.6a
	S	200.0ab	148.8a	255.0a	200.6ab
เฉลี่ย ²		247.5a	179.7a	244.4a	-

¹ ตัวเลขในแนวตั้งเดียวกัน และกำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

² ตัวเลขในแนวนอนเดียวกัน ที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 8 ปริมาณโลหะหนัก (Zn, Cd และ Fe) ในดินแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K)
นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4
และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 1

โลหะหนัก	แฟก แหล่งพันธุ์	ปริมาณของโลหะหนักในดินแฟก (กรัมต่อไร่) ¹			เฉลี่ย
		เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา (ตัน/ไร่)			
		0	4	8	
Zn	K	7.3a	17.9a	14.6a	13.3a
	N	4.0ab	10.2a	6.4b	6.9b
	P	1.9b	3.4b	5.0b	3.4b
	S	1.9b	2.7b	4.8b	3.2b
เฉลี่ย ²		3.8b	8.5a	7.7a	-
Cd	K	0.2a	0.4a	0.5a	0.4a
	N	0.1a	0.2ab	0.2b	0.2b
	P	0.1a	0.2b	0.1b	0.1b
	S	0.1a	0.1b	0.1b	0.1b
เฉลี่ย ²		0.1b	0.2a	0.3a	-
Fe	K	28.9a	54.5a	107.8a	63.7a
	N	23.8a	46.6ab	54.9b	47.8ab
	P	15.5a	24.2b	30.3b	23.3b
	S	17.2a	19.3b	32.2b	22.9b
เฉลี่ย ²		21.4b	36.2a	56.3a	-

¹ ตัวเลขในแนวนอนที่วัดในวันเดียวกัน และกำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

² ตัวเลขในแนวเดียวกัน ที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ผลการทดลองในแปลงทดลองที่ 2

1. การเจริญเติบโตของแฟก

1.1 ความสูงของแฟก

การเจริญเติบโตด้านความสูงของแฟกในแปลงทดลองที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ที่ 30, 60 และ 90 วันหลังปลูก แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 และนครสวรรค์ มีความสูงเฉลี่ยมากกว่าแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 9) ที่ 120 วันหลังปลูก แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีความสูงเฉลี่ยมากที่สุด และมากกว่าแหล่งพันธุ์อื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีความสูงเฉลี่ยเมื่อ 120 วันของแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ เท่ากับ 137.1, 113.7, 111.1 และ 97.0 เซนติเมตร ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปุ๋ยหมักที่มีต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงของแฟก แสดงให้เห็นว่า ที่ 30 วันหลังปลูก แฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ มีความสูงเฉลี่ยสูงสุด แต่ไม่แตกต่างกันกับแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ และแฟกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก (0 ตันต่อไร่) (ตารางที่ 9) ที่ 60 และ 90 วันหลังปลูก แฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 และ 8 ตันต่อไร่ มีความสูงเฉลี่ยของแฟกมากกว่าแฟกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนที่ 120 วันหลังปลูก แฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ มีความสูงเฉลี่ยของแฟกสูงสุด แต่ไม่แตกต่างกันกับแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 และ 0 ตันต่อไร่ โดยมีค่าเฉลี่ยความสูงของแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8, 4 และ 0 ตันต่อไร่ เท่ากับ 120.5, 119.9 และ 103.8 เซนติเมตร ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาข้อมูลด้านความสูงของแฟก แสดงให้เห็นว่า แฟกแต่ละแหล่งพันธุ์มีความสามารถเจริญเติบโตด้านความสูงได้แตกต่างกัน โดยแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 เจริญเติบโตด้านความสูงได้สูงสุด และประจวบคีรีขันธ์เจริญเติบโตด้านความสูงต่ำสุด ที่ 120 วันหลังปลูก ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในแปลงทดลองที่ 1 (ตารางที่ 2) และจากผลการทดลองทั้งสองแปลงทดลอง จะเห็นได้ว่า แหล่งพันธุ์แฟกมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโต ถึงแม้ว่าลักษณะพื้นที่ในการทดลองจะแตกต่างกันก็ตาม ส่วนปุ๋ยหมัก ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตด้านความสูงของแฟก ทั้งนี้เนื่องจาก ในแปลงทดลองที่ 2 พื้นที่ปลูกแฟกมีลักษณะเป็นพื้นที่ราบ พืชพรรณตาม

ธรรมชาติสามารถขึ้นได้ดี (ภาพที่ 11) ในขณะที่แปลงทดลองที่ 1 เป็นพื้นที่ลาดชัน (ภาพที่ 10) มีการกัดเซาะหน้าดินสูงเวลาฤดูฝน การใส่ปุ๋ยหมัก จึงเห็นผลได้เด่นชัดกว่าแปลงทดลองที่ 2

1.2 การแตกกอของแฝก

ข้อมูลด้านการแตกกอของแฝกที่ปลูกในแปลงทดลองที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ที่ 30 วัน หลังปลูก แฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี มีการแตกกอเฉลี่ยสูงสุด ไม่แตกต่างกับแหล่งพันธุ์ กำแพงเพชร-2 และนครสวรรค์ แต่มากกว่าแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 10) ที่ 60 วันหลังปลูก แฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีการแตกกอเฉลี่ยสูงสุด ไม่แตกต่างกับแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ แต่มากกว่าแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ 90 วันหลังปลูก แฝกแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ มีการแตกกอเฉลี่ยสูงสุด แต่ไม่แตกต่างกับแหล่งพันธุ์อื่น ส่วนที่ 120 วันหลังปลูก แฝกแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ มีการแตกกอเฉลี่ยสูงสุด ไม่แตกต่างกับแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ และสุราษฎร์ธานี แต่มากกว่าแหล่งพันธุ์ กำแพงเพชร-2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยการแตกกอที่ 120 วัน ของแฝกแหล่งพันธุ์ ประจวบคีรีขันธ์ นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และกำแพงเพชร-2 เท่ากับ 15.5, 15.1, 12.6 และ 9.4 ต้นต่อกอ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปุ๋ยหมักที่มีต่อการแตกกอของแฝกแต่ละแหล่งพันธุ์ จะเห็นได้ว่า ที่ 30 วันหลังปลูก แฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ต้นต่อไร่ มีการแตกกอสูงสุด แต่ไม่แตกต่างกับแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ต้นต่อไร่ และแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก (ตารางที่ 10) ที่ 60 วันหลังปลูก แฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ต้นต่อไร่ มีการแตกกอมากที่สุด และมากกว่าแฝกที่ปุ๋ยหมักอัตรา 4 ต้นต่อไร่ และแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ 90 วันหลังปลูก แฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ต้นต่อไร่ มีการแตกกอเฉลี่ยสูงสุด ไม่แตกต่างกับแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ต้นต่อไร่ แต่มากกว่าแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนที่ 120 วันหลังปลูก แฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ต้นต่อไร่ มีการแตกกอเฉลี่ยสูงสุด ไม่แตกต่างกับแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ต้นต่อไร่ และแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก โดยมีค่าเฉลี่ยของการแตกกอที่ 120 วัน ของแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8, 4 ต้นต่อไร่ และแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก เท่ากับ 11.1, 18.2 และ 10.1 ต้นต่อกอ ตามลำดับ

ตารางที่ 9 ความสูงของแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 30, 60, 90 และ 120 วัน หลังปลูกในแปลงทดลองที่ 2

อายุแฟก (วัน)	แฟก แหล่งพันธุ์	ความสูงของแฟก (เซนติเมตร) ¹ เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา (ตัน/ไร่)			เฉลี่ย
		0	4	8	
30	K	48.6a	45.4a	46.2a	49.7a
	N	41.8a	59.5a	47.7a	49.7a
	P	24.7b	23.6b	26.7b	25.1b
	S	22.9b	25.0b	27.5b	25.1b
เฉลี่ย ²		34.5a	40.6a	37.0a	-
60	K	61.7a	73.5a	64.9a	66.7a
	N	63.1a	76.6a	69.8a	69.8a
	P	38.7b	44.8b	50.2b	44.6b
	S	43.3b	46.6b	50.1b	46.7b
เฉลี่ย ²		51.7b	60.3a	58.7a	-
90	K	87.7a	107.7a	95.4ab	97.0a
	N	77.1ab	100.7a	99.7a	92.5a
	P	61.1c	72.9b	86.2b	73.4b
	S	66.3b	75.8b	81.7b	74.6b
เฉลี่ย ²		73.1b	89.3a	90.7a	-
120	K	128.1a	150.3a	132.8a	137.1a
	N	103.0b	120.2b	117.8a	113.7bc
	P	86.5b	94.5c	110.1a	97.0c
	S	97.9b	114.5b	121.1a	111.1bc
เฉลี่ย ²		103.8a	119.9a	120.5a	-

¹ ตัวเลขในแนวดังที่วัดในวันเดียวกัน และกำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

² ตัวเลขในแนวเดียวกัน ที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ตารางที่ 10 การแตกกอของแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 30, 60, 90 และ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 2

อายุแฟก (วัน)	แฟก แหล่งพันธุ์	การแตกกอของแฟก (ต้นต่อกอ) ¹ เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา (ตัน/ไร่)			เฉลี่ย
		0	4	8	
30	K	1.4a	1.6a	1.5a	1.5a
	N	1.3a	1.4ab	1.7a	1.5a
	P	1.1b	1.2b	1.1b	1.1b
	S	1.3b	1.6a	1.6a	1.5a
เฉลี่ย ²		1.3ab	1.5a	1.5a	-
60	K	2.0a	2.7a	2.7a	2.5a
	N	1.8a	2.1b	3.1a	2.3a
	P	1.3b	1.5c	2.3b	1.7c
	S	1.9a	2.3ab	2.2b	2.1b
เฉลี่ย ²		1.8b	2.1a	2.6a	-
90	K	4.8a	6.6a	7.6a	6.4a
	N	5.3a	7.6a	10.1a	7.7a
	P	3.9a	8.2a	9.8a	7.3a
	S	4.2a	7.1a	7.2a	6.1a
เฉลี่ย ²		4.5b	7.4a	8.7a	-
120	K	8.1a	12.7b	7.3a	9.4b
	N	12.6a	20.9a	11.7a	15.1a
	P	10.3a	21.5a	14.6a	15.5a
	S	9.3a	17.6ab	10.8a	12.6ab
เฉลี่ย ²		10.1a	18.2a	11.1a	-

¹ ตัวเลขในแนวดังที่วัดในวันเดียวกัน และกำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

² ตัวเลขในแนวเดียวกัน ที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

เมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตด้านการแตกกอของแฝก จะเห็นได้ว่า แฝกแต่ละแหล่งพันธุ์มีการแตกกอที่ต่างกัน โดยแฝกแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ มีอัตราการแตกกอเฉลี่ยที่ 120 วันหลังปลูกสูงสุด ในขณะที่ กำแพงเพชร-2 ซึ่งมีการเจริญเติบโตด้านความสูงดีที่สุด มีอัตราการแตกกอดำสุด ส่วนการใส่ปุ๋ยหมักถึงแม้ตัวเลขทางสถิติไม่แตกต่างกัน แต่จะเห็นว่า แฝกแต่ละแหล่งพันธุ์มีอัตราการแตกกอเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนวันปลูกเพิ่มขึ้น และแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักมีอัตราการแตกกอเฉลี่ยมากกว่าแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก (ตารางที่ 10) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในแปลงทดลองที่ 1 (ตารางที่ 3)

1.3 น้ำหนักแห้งของแฝก

เมื่อเก็บเกี่ยวแฝกที่ 120 วันหลังปลูก แล้วบันทึกข้อมูลด้านน้ำหนักแห้งของแฝกแต่ละแหล่งพันธุ์ แสดงให้เห็นว่า แฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 ให้น้ำหนักแห้งเฉลี่ยสูงสุด แตกต่างกับกับแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 11) โดยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของแฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ เท่ากับ 548.8, 278.4, 192.8 และ 117.1 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ

แฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ ให้น้ำหนักแห้งเฉลี่ยสูงสุด แต่ไม่แตกต่างกันกับแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ และแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก (ตารางที่ 11) โดยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8, 4 ตันต่อไร่ และแฝกไม่ได้รับปุ๋ยหมัก เท่ากับ 278.1, 356 และ 218.7 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาข้อมูลด้านการเจริญเติบโตด้านความสูง การแตกกอ และน้ำหนักแห้งของแฝก แสดงให้เห็นว่า แฝกมีความสามารถเจริญเติบโตในดินเหมืองแร่สังกะสีได้ดี และแฝกแต่ละแหล่งพันธุ์มีการเจริญเติบโตด้านความสูง การแตกกอ และน้ำหนักแห้งแตกต่างกัน โดยแฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีการเจริญเติบโตในด้านความสูงและน้ำหนักแห้งดีที่สุด ขณะที่แฝกแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์มีการแตกกอสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในแปลงทดลองที่ 1 ส่วนอิทธิพลของปุ๋ยหมักในแปลงทดลองที่ 2 แสดงผลไม่เด่นชัด โดยส่งผลต่อความสูง การแตกกอ และน้ำหนักแห้งของแฝก ไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่มีแนวโน้มในการเจริญเติบโตดีกว่าแปลงทดลองที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจาก แฝกในแปลงทดลองที่ 2 มีความสูง การแตกกอ และน้ำหนักแห้งดีกว่าแฝกในแปลงทดลองที่ 1

ตารางที่ 11 น้ำหนักแห้งของดินแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 2

แฟก แหล่งพันธุ์	น้ำหนักแห้งของดินแฟก (กิโลกรัมต่อไร่) ¹ เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา (ตัน/ไร่)			เฉลี่ย
	0	4	8	
K	484.3a	742.4a	419.7a	548.8a
N	175.5b	411.5b	248.5ab	278.4b
P	78.1b	89.3c	183.2b	117.1c
S	136.5b	180.3c	261.6ab	192.8bc
เฉลี่ย ²	218.7a	356.0a	278.1a	-

¹ ตัวเลขในแนวตั้งเดียวกัน และกำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

² ตัวเลขในแนวนอนเดียวกัน ที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

2. ปริมาณธาตุอาหารพืชในดินแฟก (ส่วนเหนือดิน)

2.1 ความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชในดินแฟก

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนโตรเจนในดินแฟกทั้ง 4 แหล่งพันธุ์ แสดงให้เห็นว่า แฟกแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ มีความเข้มข้นเฉลี่ยของไนโตรเจน (11.1 กรัมต่อกิโลกรัม) และ ฟอสฟอรัส (1.6 กรัมต่อกิโลกรัม) ในดินสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี กำแพงเพชร-2 และนครสวรรค์ (ตารางที่ 12) ขณะที่ความเข้มข้นของโพแทสเซียมในดินแฟกแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์สูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 แต่มากกว่าแหล่งพันธุ์ นครสวรรค์ และสุราษฎร์ธานี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของโพแทสเซียม ในดินแฟกแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ กำแพงเพชร-2 นครสวรรค์ และสุราษฎร์ธานี เท่ากับ 10.4, 10.3, 8.0 และ 7.3 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ส่วนอิทธิพลของปุ๋ยหมัก จะเห็นได้ว่า แผลงที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ มีความเข้มข้นเฉลี่ยของไนโตรเจน (9.7 กรัมต่อกิโลกรัม) และโพแทสเซียม (9.7 กรัมต่อกิโลกรัม) ในดินสูงสุด แต่ไม่แตกต่างกันกับแผลงที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ และแผลงที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก (ตารางที่ 12) ขณะที่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในดินแผลง แสดงให้เห็นว่า แผลงที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ มีความเข้มข้นเฉลี่ยของฟอสฟอรัสในดินแผลงสูงสุด และมากกว่าแผลงที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ และแผลงที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในแผลงที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8, 4 ตันต่อไร่ และแผลงที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก เท่ากับ 1.9, 1.5 และ 1.0 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

จากข้อมูลในตารางที่ 12 แสดงให้เห็นว่า ดินแผลงมีความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม อยู่ในช่วง 9.4-11.1, 1.4-1.6 และ 7.3-10.4 กรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยแผลงแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์มีความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมสูงสุด โดยมีความเข้มข้นของโพแทสเซียมในดินแผลงสูงสุด และมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในดินแผลงต่ำสุด แตกต่างกับผลการทดลองในแปลงที่ 1 ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจาก ดินในแปลงที่ 2 มีพีเอชเป็นกรด ทำให้มีธาตุเหล็กและอะลูมิเนียมละลายได้มาก ซึ่งธาตุเหล่านี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างฟอสเฟตกับไอออนบวกของเหล็กและอะลูมิเนียม ซึ่งอาจส่งผลให้ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินลดลง (ยงยุทธ, 2546) ส่วนการใส่ปุ๋ยหมัก แม้ไม่มีผลต่อความเข้มข้นของไนโตรเจน และโพแทสเซียม แต่ส่งเสริมให้มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในดินแผลงที่ได้รับปุ๋ยหมักมากกว่าแผลงที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2.2 ปริมาณธาตุอาหารพืชที่แผลงสามารถดูดซึมไว้ในดินได้

ข้อมูลด้านปริมาณไนโตรเจนของแผลงแต่ละแหล่งพันธุ์ แสดงให้เห็นว่า แผลงแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยในดินแผลงมากที่สุด และมากกว่าแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 13) โดยมีค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนในดินแผลง เท่ากับ 5,273, 2,937, 2,100 และ 1,279 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ

ตารางที่ 12 ความเข้มข้นของธาตุอาหารพืช (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม) ในแฟก
แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี
(S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 2

ธาตุอาหารพืช	แฟก แหล่งพันธุ์	ความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชในดินแฟก (กรัมต่อกิโลกรัม) ¹ เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา (ตัน/ไร่)			เฉลี่ย
		0	4	8	
ไนโตรเจน	K	10.4ab	8.3a	10.1a	9.8a
	N	7.4b	9.8a	11.0a	9.4a
	P	11.7a	10.8a	10.7a	11.1a
	S	11.1ab	10.4a	11.4a	11.0a
เฉลี่ย ²		10.2a	10.0a	10.8a	-
ฟอสฟอรัส	K	1.0a	1.2ab	1.9ab	1.4a
	N	1.1a	1.1b	2.3a	1.5a
	P	1.0a	1.9a	1.9ab	1.6a
	S	1.0a	1.5ab	1.6b	1.4a
เฉลี่ย ²		1.0c	1.5b	1.9a	-
โพแทสเซียม	K	9.0a	11.8a	10.1ab	10.3a
	N	7.9b	7.1b	9.0ab	8.0b
	P	9.5a	9.8ab	12.0a	10.4a
	S	6.6a	7.5b	7.7b	7.3b
เฉลี่ย ²		8.3a	9.1a	9.7a	-

¹ ตัวเลขในแนวดังเดียวกัน และกำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ
โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

² ตัวเลขในแนวนอนเดียวกัน ที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดย
วิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณฟอสฟอรัสในดินแฟก แสดงให้เห็นว่า แฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีปริมาณฟอสฟอรัสเฉลี่ยในดินสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี แต่มากกว่าประจวบคีรีขันธ์ และนครสวรรค์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 13) โดยมีค่าเฉลี่ยของฟอสฟอรัสในดินแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 สุราษฎร์ธานี ประจวบคีรีขันธ์ และนครสวรรค์ เท่ากับ 494, 426, 270 และ 203 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ

ปริมาณโพแทสเซียมในแฟกแต่ละแหล่งพันธุ์ แสดงให้เห็นว่า แฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีปริมาณโพแทสเซียมเฉลี่ยในดินสูงสุด แตกต่างกับแหล่งพันธุ์อื่น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 13) โดยมีค่าเฉลี่ยปริมาณโพแทสเซียมของแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ เท่ากับ กรัมต่อไร่ ตามลำดับ 5,787, 2,412, 1,442 และ 1,272 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปุ๋ยหมักที่มีต่อปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในแฟกแต่ละแหล่งพันธุ์ แสดงให้เห็นว่า แฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ มีปริมาณไนโตรเจน และโพแทสเซียมในดินสูงสุด (3,396 และ 3,491 กรัมต่อไร่) แต่ไม่แตกต่างกันกับแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ และแฟกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก ขณะที่แฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ มีปริมาณฟอสฟอรัสในดินสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ แต่มากกว่าแฟกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีปริมาณฟอสฟอรัสของแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8, 4 และ 0 ตันต่อไร่ เท่ากับ 574, 460 และ 245 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ

ตารางที่ 13 ปริมาณของธาตุอาหารพืช (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม) ในแฟก
แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี
(S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 2

ธาตุอาหารพืช	แฟก แหล่งพันธุ์	ปริมาณของธาตุอาหารพืชในดินแฟก (กรัมต่อไร่) ¹			เฉลี่ย
		เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา (ตัน/ไร่)			
		0	4	8	
ไนโตรเจน	K	5,078a	6,609a	4,131a	5,273a
	N	2,138b	4,157b	2,515a	2,937b
	P	903b	963c	1,970a	1,279c
	S	1,574b	1,856c	2,871a	2,100bc
เฉลี่ย ²		2,423a	3,396a	2,872a	-
ฟอสฟอรัส	K	535a	913a	769b	494a
	N	200b	478b	802a	203b
	P	86b	166c	356c	270b
	S	158b	284b	369c	426a
เฉลี่ย ²		245b	460ab	574a	-
โพแทสเซียม	K	4,340a	8,889a	4,133a	5,787a
	N	1,324b	2,814b	3,098a	2,412b
	P	745b	885b	2,186a	1,272b
	S	979b	1,375b	1,972a	1,442b
เฉลี่ย ²		1,847a	3,491a	2,847a	-

¹ ตัวเลขในแนวดังเดียวกัน และกำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

² ตัวเลขในแนวนอนเดียวกัน ที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จากข้อมูลในตารางที่ 13 แสดงให้เห็นว่า แผลแต่ละแหล่งพันธุ์มีความสามารถในการดูดซึมธาตุอาหารพืชได้แตกต่างกัน โดยแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 สามารถดูดซึมธาตุอาหารพืชไปสะสมในต้นได้สูงสุด โดยสามารถดูดซึมไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมไว้ในต้นได้สูงถึง 5,273, 494 และ 5,787 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในแปลงทดลองที่ 1 (ตารางที่ 6) และจะเห็นได้ว่า แผลแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 สามารถดูดซึมโพแทสเซียมได้มากกว่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจาก โพแทสเซียมเป็นธาตุอาหารพืชที่เคลื่อนย้ายได้ง่าย จึงทำให้พืชสามารถดูดซึมและสะสมไว้ในต้นพืชได้มากกว่าธาตุอาหารพืชอื่น (ยงยุทธ, 2546) นอกจากนี้ พืชที่ได้รับโพแทสเซียมในปริมาณที่เพียงพอจะช่วยให้พืชทนแล้งได้ดี (Marchner, 1995) ดังนั้น แผลซึ่งเป็นพืชที่ทนต่อสภาวะแห้งแล้งได้ดี (กรมพัฒนาที่ดิน, 2541ก; สำนักงาน กปร., 2545) ส่วนการใส่ปุ๋ยหมัก แม้ไม่มีผลต่อปริมาณของไนโตรเจน และโพแทสเซียมในต้นแผล แต่ช่วยทำให้แผลมีปริมาณฟอสฟอรัสสูง ดังนั้น ในทางปฏิบัติของการปลูกแผล อาจมีการใส่ปุ๋ยหมักในอัตรา 4 ตันต่อไร่ที่เป็นอัตราที่แนะนำโดยกรมพัฒนาที่ดิน (2541ข) เพื่อช่วยส่งเสริมในการดูดซึมฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของแผลเพิ่มขึ้น

3. ปริมาณของโลหะหนักในต้นแผล

3.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักในต้นแผล

ข้อมูลจากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในต้นแผล จะเห็นได้ว่า แผลแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ มีความเข้มข้นเฉลี่ยของสังกะสีสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ และสุราษฎร์ธานี แต่มากกว่าแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 14) โดยมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสังกะสีในต้นแผลแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ ประจวบคีรีขันธ์ สุราษฎร์ธานี และกำแพงเพชร-2 เท่ากับ 68.0, 66.6, 57.4 และ 53.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ขณะที่แผลแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ มีความเข้มข้นของแคดเมียมสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ แต่มากกว่าแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี และกำแพงเพชร-2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมในต้นแผลแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และกำแพงเพชร-2 เท่ากับ 1.7, 1.6, 1.4 และ 1.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และแผลแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ มีความเข้มข้นของเหล็กสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ และสุราษฎร์ธานี แต่มากกว่ากำแพงเพชร-2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมี

ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของเหล็กในแฟกแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และ กำแพงเพชร-2 เท่ากับ 303.3, 286.4, 262.5 และ 187.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ส่วนปุ๋ยหมัก จะเห็นได้ว่า แฟกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก มีความเข้มข้นเฉลี่ยของสังกะสี และ เหล็กสูงสุด (63.3 และ 307.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) แต่ไม่แตกต่างกันกับแฟกที่ได้รับปุ๋ย หมักอัตรา 4 และ 8 ต้นต่อไร่ ขณะที่แฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ต้นต่อไร่ มีความเข้มข้นแคดเมียม สูงสุด (1.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) แต่ไม่แตกต่างกันกับแฟกที่ใส่ปุ๋ยหมักอัตราอื่น (ตารางที่ 14)

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของโลหะหนักในดินแฟกในตารางที่ 14 แสดงให้เห็นว่า แฟก แหล่งพันธุ์นครสวรรค์มีความเข้มข้นเฉลี่ยของสังกะสีสูงสุด (68.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งแตกต่าง กันกับแปลงทดลองที่ 1 ที่แสดงให้เห็นว่าแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีความเข้มข้นเฉลี่ยของสังกะสี สูงสุด (45.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) Troung (2002) ได้รายงานไว้ว่า แฟกสามารถดูดซึมสังกะสีได้สูง ถึง 880 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยแฟกไม่แสดงอาการเป็นพิษ

ขณะที่แฟกแหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์มีความเข้มข้นเฉลี่ยของแคดเมียมสูงสุด (1.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และเหล็กสูงสุด (303.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งสอดคล้องกันกับผลการ ทดลองในแปลงที่ 1 ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า แฟกแต่ละแหล่งพันธุ์มีความสามารถในการดูดซึมโลหะหนัก ได้แตกต่างกัน เช่นเดียวกับสรตนา (2548) ได้กล่าวไว้ว่า แหล่งพันธุ์แฟกเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ การดูดซึมโลหะหนัก และมีการสะสมโลหะหนักไว้ในส่วนของลำต้น และใบแฟกสูงสุด โดยมื ความเข้มข้นเฉลี่ยของสังกะสี และแคดเมียม เท่ากับ 227.4 และ 5.79 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม Roongtanakiat and Chairaj (2002) ได้รายงานไว้ว่า แฟกสามารถสะสมสังกะสี และแคดเมียมไว้ใน ต้นได้สูงถึง 253.8 และ 2.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ แฟกสามารถดูดซึมสังกะสี และเหล็กไว้ในลำต้นและใบได้สูงถึง 165.75 และ 46.58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (สุทธิรักษ์ และคณะ, 2549) และ Pendias (1992, 2001) ได้รายงานไว้ว่า พืชพวกหญ้าสามารถดูดซึม และสะสมสังกะสี แคดเมียม และเหล็กได้สูง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 12-47, 0.07-0.27 และ 2,127-3,580 มิลลิกรัมต่อ กิโลกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 14 ความเข้มข้นของโลหะหนัก (Zn, Cd และ Fe) ในแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 2

โลหะหนัก	แฟก แหล่งพันธุ์	ความเข้มข้นของโลหะหนักในดินแฟก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ¹ เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา (ตัน/ไร่)			เฉลี่ย
		0	4	8	
Zn	K	54.7a	52.4 a	54.6a	53.9b
	N	68.6a	69.1a	66.3a	68.0a
	P	68.9a	67.9a	63.0a	66.6ab
	S	60.8a	52.5a	59.0a	57.4ab
เฉลี่ย ²		63.3a	60.5a	60.7a	-
Cd	K	1.2b	1.1b	1.3a	1.2c
	N	1.6ab	1.5ab	1.6a	1.6ab
	P	1.8a	1.7a	1.6a	1.7a
	S	1.4ab	1.2ab	1.5a	1.4bc
เฉลี่ย ²		1.5a	1.4a	1.5a	-
Fe	K	202.3b	178.7b	181.7a	187.6b
	N	314.8ab	309.8a	234.7a	284.4a
	P	350.6a	289.9ab	269.5a	303.3a
	S	362.9a	187.9ab	236.7a	262.5a
เฉลี่ย ²		307.7a	241.6a	230.7a	-

¹ ตัวเลขในแนวดิ่งเดียวกัน และกำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ

โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

² ตัวเลขในแนวนอนเดียวกัน ที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

จากข้อมูล จะเห็นได้ว่า ถึงแม้แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 จะมีความเข้มข้นของโลหะหนักในต้นต่ำ แต่ถ้าหากพิจารณาข้อมูลการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งร่วมด้วย อาจจะมีแนวโน้มทำให้สามารถดูดซึมโลหะหนักได้สูงสุด ส่วนปุ๋ยหมักไม่ส่งผลต่อความเข้มข้นของสังกะสี แคดเมียม และเหล็กในดินแฟก เช่นเดียวกับผลการทดลองในแปลงทดลองที่ 1 (ตารางที่ 7) แต่อย่างไรก็ตาม ปุ๋ยหมักส่งเสริมด้านการเจริญเติบโตของแฟก เพราะปุ๋ยหมักช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน ช่วยทำให้ดินร่วนซุย และอุ้มน้ำได้ดี (กรมวิชาการเกษตร, 2548)

3.2 ปริมาณโลหะหนักที่แฟกสามารถดูดซึมไว้ในต้นได้

ข้อมูลด้านปริมาณสังกะสี แคดเมียม และเหล็กในดินแฟก แสดงให้เห็นว่า แฟกต่างแหล่งพันธุ์มีความสามารถในการดูดซึมโลหะหนักได้แตกต่างกัน โดยแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีมากที่สุด และมากกว่าแฟกแหล่งพันธุ์อื่น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 15) โดยมีปริมาณเฉลี่ยสังกะสีทั้งหมดของแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ เท่ากับ 29.2, 21, 10.5 และ 7.7 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ มีปริมาณเฉลี่ยแคดเมียมทั้งหมดของแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 สูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ แต่มากกว่าสุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีปริมาณเฉลี่ยของแคดเมียมทั้งหมดของแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ เท่ากับ 0.7, 0.5, 0.3 และ 0.2 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ และแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีปริมาณเหล็กสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแหล่งพันธุ์นครสวรรค์ แต่มากกว่าสุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีปริมาณเฉลี่ยเหล็กทั้งหมดของแฟกพันธุ์กำแพงเพชร-2 นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ เท่ากับ 99.7, 85.6, 42.3 และ 33.6 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ

แฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ มีปริมาณเฉลี่ยสังกะสีสูงสุด ไม่แตกต่างกันกับแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 ตันต่อไร่ แต่มากกว่าแฟกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 15) โดยมีปริมาณสังกะสีทั้งหมดในแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4, 8 และ 0 ตันต่อไร่ เท่ากับ 20.7, 17.6 และ 13 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ และแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ มีปริมาณเฉลี่ยของแคดเมียม (1.1 กรัมต่อไร่) และเหล็ก (188.2 กรัมต่อไร่) สูงสุด แต่ไม่แตกต่างกันกับแฟกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 และ 0 ตันต่อไร่

จากปริมาณโลหะหนักทั้งหมดของแฟกในแต่ละแหล่งพันธุ์ในตารางที่ 15 แสดงให้เห็นว่า แฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 สามารถดูดซึมสังกะสี แคดเมียม และเหล็ก ได้สูงสุด ในขณะที่แหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ สามารถดูดซึมสังกะสี แคดเมียม และเหล็ก ได้ต่ำสุด โดยแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีปริมาณทั้งหมดของสังกะสี แคดเมียม และเหล็ก เท่ากับ 29.2, 0.7 และ 99.7 กรัม ต่อไร่ ตามลำดับ ดังนั้น แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 จึงเหมาะสมที่จะนำมาปลูกในดินเหมืองแร่สังกะสี เพราะนอกจากจะสามารถเจริญเติบโตได้ดีแล้ว ยังสามารถดูดซึมโลหะหนักได้สูงสุด

เมื่อพิจารณาข้อมูลด้านการเจริญเติบโต ด้านความสูง การแตกกอ และน้ำหนักแห้งของแฟกที่ปลูกในแปลงทดลองที่ 1 และ 2 จะเห็นได้ว่า แหล่งพันธุ์มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของแฟก ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของสรัดนา (2548) ได้รายงานไว้ว่า แหล่งพันธุ์แฟกเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของแฟก และแฟกสามารถเจริญเติบโตได้ในดินปนเปื้อนโลหะหนัก (Truong and Baker, 1998; Zheng *et al.*, 1998; Roongtanakiat and Chairroj, 2001) เมื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของแฟกแต่ละแหล่งพันธุ์ แสดงให้เห็นว่า แฟกที่ปลูกในดินเหมืองแร่สังกะสีทั้งสองแปลงทดลอง แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีการเจริญเติบโตดีที่สุด ส่วนการใส่ปุ๋ยหมัก ในแปลงทดลองที่ 1 แสดงผลเด่นชัดต่อความสูงและน้ำหนักแห้งของแฟก ขณะที่ แปลงทดลองที่ 2 ปุ๋ยหมักไม่แตกต่างกัน แต่มีแนวโน้มของการเจริญเติบโตของแฟกแปลงทดลองที่ 2 ดีกว่าแปลงทดลองที่ 1 ทั้งนี้อาจมาจากสิ่งแวดล้อมทางกายภาพของดินในแปลงทดลองที่ 2 (ภาพที่ 12) ซึ่งเป็นพื้นที่ราบพืชพรรณธรรมชาติขึ้นได้ดี

ข้อมูลด้านความเข้มข้น และความสามารถในการดูดซึมโลหะหนัก ได้แก่ สังกะสี แคดเมียม และเหล็ก ของแฟกที่ปลูกในแปลงทดลองที่ 1 และ 2 พบว่า แฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีความสามารถในการดูดซึมสังกะสี แคดเมียม และเหล็ก ได้ดีที่สุด ทั้งนี้ แฟกแต่ละแหล่งพันธุ์มีความสามารถในการดูดซึมโลหะหนักได้แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Roongtanakiat and Chairroj (2002) ได้กล่าวไว้ว่า แหล่งพันธุ์แฟกมีอิทธิพลต่อการดูดซึมโลหะหนัก และ Alloway (1995) ได้รายงานไว้ว่า พืชแต่ละชนิดมีความสามารถและการสะสมของโลหะหนักได้ต่างกัน โดยในพืชพวกหญ้า มีความสามารถในการสะสมโลหะหนัก เช่น สังกะสี แคดเมียม และเหล็ก ได้สูงถึง 12-47, 0.07-0.27 และ 2,127-3,580 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Pendias, 1992, 2001)

ดังนั้น แหล่งพันธุ์ที่เหมาะสมที่จะนำไปปลูกในเมืองแร่สังกะสี ที่มีความเข้มข้นของสังกะสีสูง คือ แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 เพราะนอกจากจะสามารถเจริญเติบโตได้ดีแล้ว ยังสามารถดูดซึมโลหะหนักได้สูงสุด และในทางปฏิบัติของการปลูกแฝก ควรมีการใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 4 ตันต่อไร่ เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของแฝก ช่วยให้การดูดซึมโลหะหนักในดินแฝกได้ดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 15 ปริมาณโลหะหนักในดินแฟกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 (K) นครสวรรค์ (N) ประจวบคีรีขันธ์ (P) และสุราษฎร์ธานี (S) เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา 0, 4 และ 8 ตันต่อไร่ ที่ 120 วันหลังปลูก ในแปลงทดลองที่ 2

โลหะหนัก	แฟก แหล่งพันธุ์	ปริมาณของโลหะหนักในดินแฟก (กรัมต่อไร่) ¹ เมื่อใส่ปุ๋ยหมักอัตรา (ตัน/ไร่)			เฉลี่ย
		0	4	8	
Zn	K	26.9a	38.8a	21.8ab	29.2a
	N	12.0b	28.4b	22.7a	21.0b
	P	5.2b	6.2c	11.7b	7.7c
	S	7.7b	9.5c	14.2ab	10.5c
เฉลี่ย ²		13.0b	20.7a	17.6ab	-
Cd	K	0.6a	0.8a	0.5a	0.7a
	N	0.3ab	3.4a	0.6a	0.5a
	P	0.1b	0.2b	0.3a	0.2b
	S	0.2b	0.2b	0.4a	0.3b
เฉลี่ย ²		0.3a	0.5a	0.4a	-
Fe	K	90.3a	132.9a	66.3a	99.7a
	N	44.5ab	131.9a	80.3a	85.6a
	P	23.3b	27.7b	49.8a	33.6b
	S	41.5ab	33.6b	51.8a	42.3b
เฉลี่ย ²		49.9a	81.5a	64.5a	-

¹ ตัวเลขในแนวดิ่งที่วัดในวันเดียวกัน และกำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

² ตัวเลขในแนวเดียวกัน ที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

การเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักเมื่อวิเคราะห์โดยวิธีอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโทรสโกปี กับวิธีการวาวรังสีเอกซ์

1. กราฟมาตรฐานเพื่อวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

เพื่อเปรียบเทียบเทคนิคของอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) กับการวาวรังสีเอกซ์ (XRF) ในการวิเคราะห์โลหะหนัก ได้สุ่มตัวอย่างดินหลังจากการย่อยด้วยกรดผสมไนตริกเข้มข้น (conc. HNO_3) และไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. HCl) ในอัตราส่วน 1:3 และสุ่มตัวอย่างแผ่นหลังจากย่อยด้วยกรดผสมไนตริกเข้มข้น (conc. HNO_3) และเปอร์คลอริกเข้มข้น (conc. HClO_4) ในอัตราส่วน 2:1 ศึกษาการวิเคราะห์สังกะสีและเหล็ก เปรียบเทียบค่าที่ได้จากทั้ง 2 เทคนิค เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์สำหรับการวิเคราะห์โลหะหนักต่อไป

ในการวิเคราะห์สังกะสีและเหล็ก ได้สร้างกราฟมาตรฐานสังกะสีและเหล็ก เพื่อการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานจาก $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ ให้มีความเข้มข้นของสังกะสีเท่ากับ 1, 2, 3, 4 และ 5 ppm (part per million, ppm) และเตรียมสารมาตรฐานเหล็กจาก $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm ใช้สารละลายทั้ง 2 ชุดในการทำกราฟมาตรฐาน เพื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นโลหะหนักในตัวอย่างดิน โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance, Abs.) ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโทรสโกปี และวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์ ของสารละลายมาตรฐานทั้ง 2 ชุด จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารมาตรฐาน สำหรับการวิเคราะห์ดินโดยวิธี AAS และความสัมพันธ์ของความเข้มรังสีเอกซ์กับความเข้มข้นของสารมาตรฐาน สำหรับการวิเคราะห์ดิน โดยวิธี XRF ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นดังสมการ (5)–(8)

กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์สังกะสีและเหล็ก โดยวิธี AAS [ภาพที่ 15 (a, b)] แสดงดังสมการ

$$\text{สังกะสี : } y = 0.1673x + 0.0286 \quad R^2 = 0.9941 \quad (5)$$

$$\text{เหล็ก : } y = 0.0145x + 0.0898 \quad R^2 = 0.9383 \quad (6)$$

เมื่อ $y =$ ค่าการดูดกลืนแสง
 $x =$ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานในหน่วย ppm
 $R^2 =$ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสง (y) และความเข้มข้น (x)

กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์สังกะสีและเหล็กด้วยวิธี XRF [ภาพที่ 16 (a, b)] แสดงดังสมการ

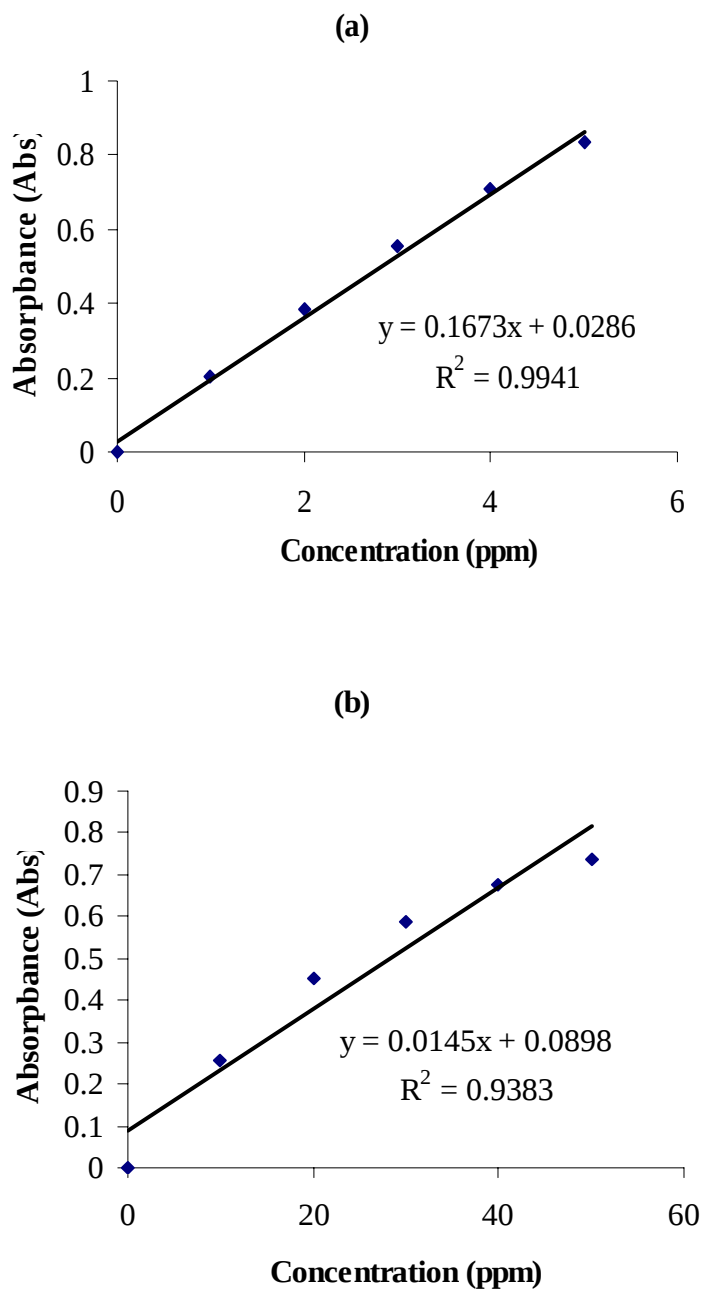
$$\text{สังกะสี : } y = 1302.6x - 48.09 \quad R^2 = 0.9376 \quad (7)$$

$$\text{เหล็ก : } y = 909.31x - 1852.9 \quad R^2 = 0.9709 \quad (8)$$

เมื่อ $y =$ ความเข้มของรังสีเอกซ์
 $x =$ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานในหน่วย mg/ml
 $R^2 =$ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความเข้มของรังสีเอกซ์ (y) และความเข้มข้น (x)

จากการสร้างกราฟมาตรฐานสังกะสีและเหล็ก เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน โดยวิธี AAS และ XRF แสดงให้เห็นว่า ได้กราฟมีความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ดี คือ ค่า $r^2 > 0.9000$ แสดงให้เห็นว่า กราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้นสามารถใช้เปรียบเทียบเพื่อหาค่าความเข้มข้นของสังกะสีและเหล็กในการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน ได้เป็นอย่างดี (หญิงเล็ก, 2534) แต่อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่า ทั้ง 2 วิธีได้สมการที่ต่างกัน ทำให้มีความชัน (slope) ของกราฟต่างกันด้วย โดยวิธี AAS จะมีความชันของกราฟมาตรฐานสังกะสีและเหล็ก เท่ากับ 0.1673 และ 0.0145 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าความชันของกราฟที่ได้จากวิธี XRF ที่มีค่าเท่ากับ 1302.6 และ 909.31 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก ในการวิเคราะห์โดย XRF ใช้สารละลายมาตรฐานสังกะสีและเหล็ก หลังจากเตรียมด้วยวิธีที่กล่าวมา นำมาหยดบนกระดาษกรอง แล้วนำมาวัดค่าความเข้มรังสีเอกซ์ โดยค่ากระดาษกรองเปล่านั้นมีค่าพื้นหลัง (background) แสดงโดยสเปกตรัมในภาพที่ 17 แสดงว่ากระดาษกรองมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบ คือ คลอรีน (Cl) แคลเซียม (Ca) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และแกลเลียม (Ga) ซึ่งธาตุสังกะสีและเหล็กที่ได้จากกระดาษกรองเปล่านั้นมีสเปกตรัมสูงมากเมื่อเทียบกับสเปกตรัมของสังกะสีและเหล็กในการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน (ภาพที่ 18) และตัวอย่างแฝก (ภาพที่ 19) ทั้งนี้ ธาตุสังกะสีและเหล็กที่ได้จากกระดาษกรองเปล่า อาจส่งผลกระทบต่อการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ในตัวอย่างดินและแฝกได้ ขณะที่

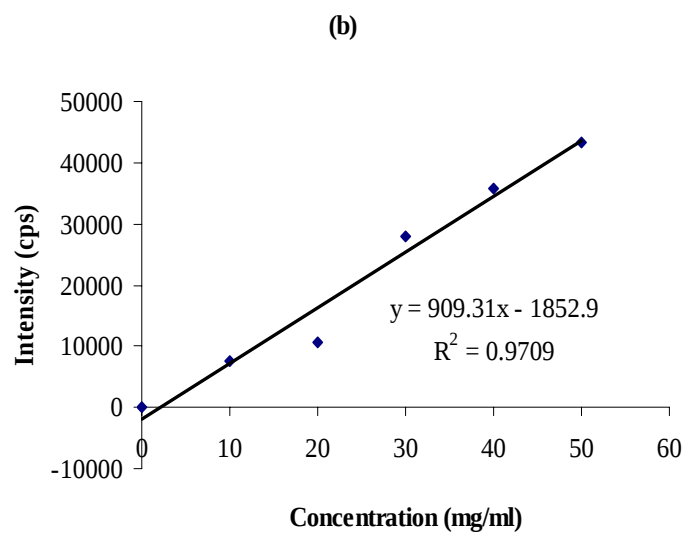
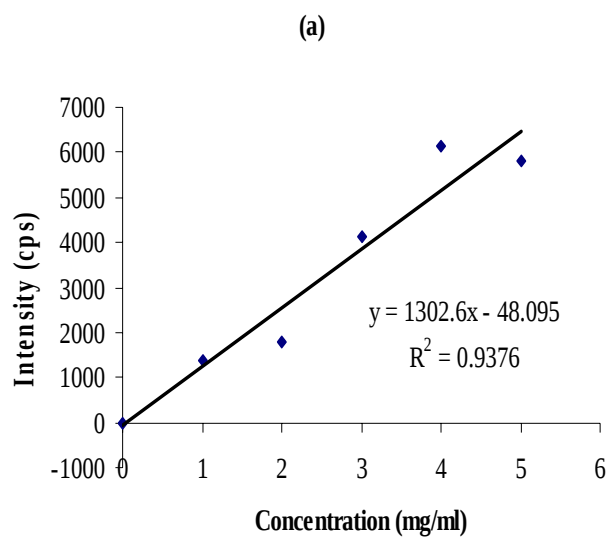
แคดเมียม (Cd) ไม่ปรากฏให้เห็น (ภาพที่ 18-19) เนื่องจากความเข้มข้นของแคดเมียมมีน้อยเกินไป จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธี XRF ได้



ภาพที่ 15 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ดินโดยอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

a = กราฟมาตรฐานสังกะสี

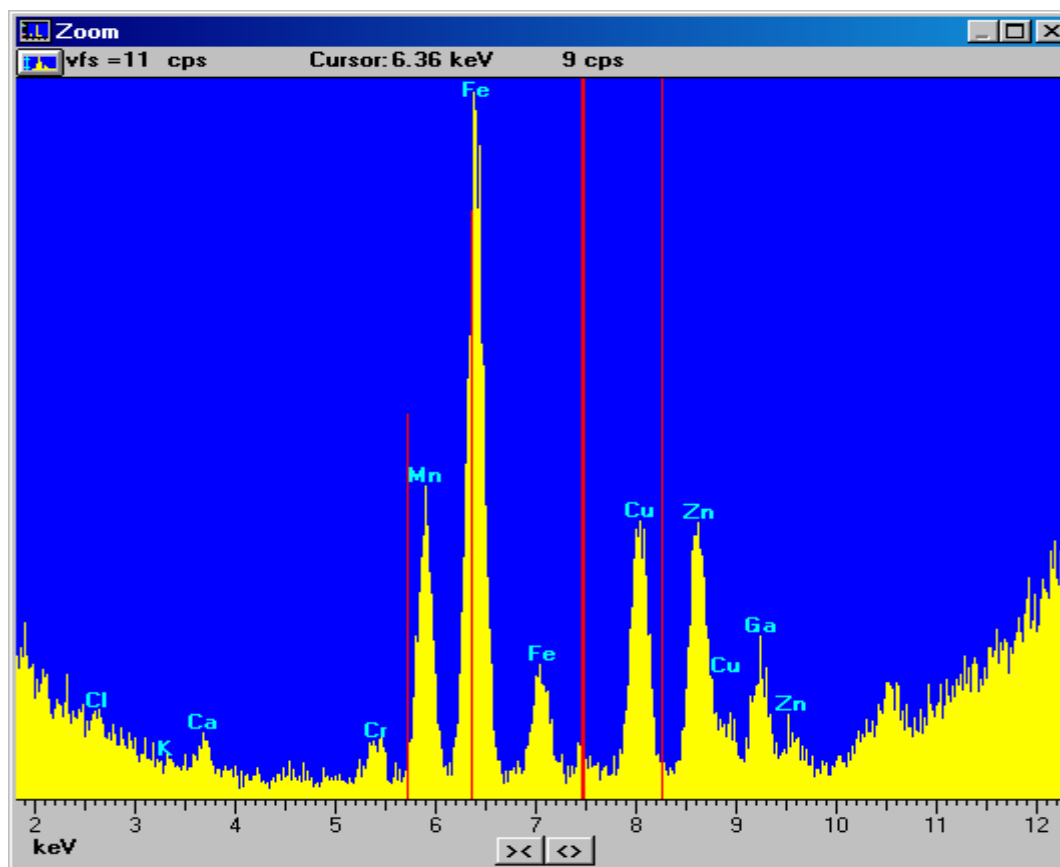
b = กราฟมาตรฐานเหล็ก



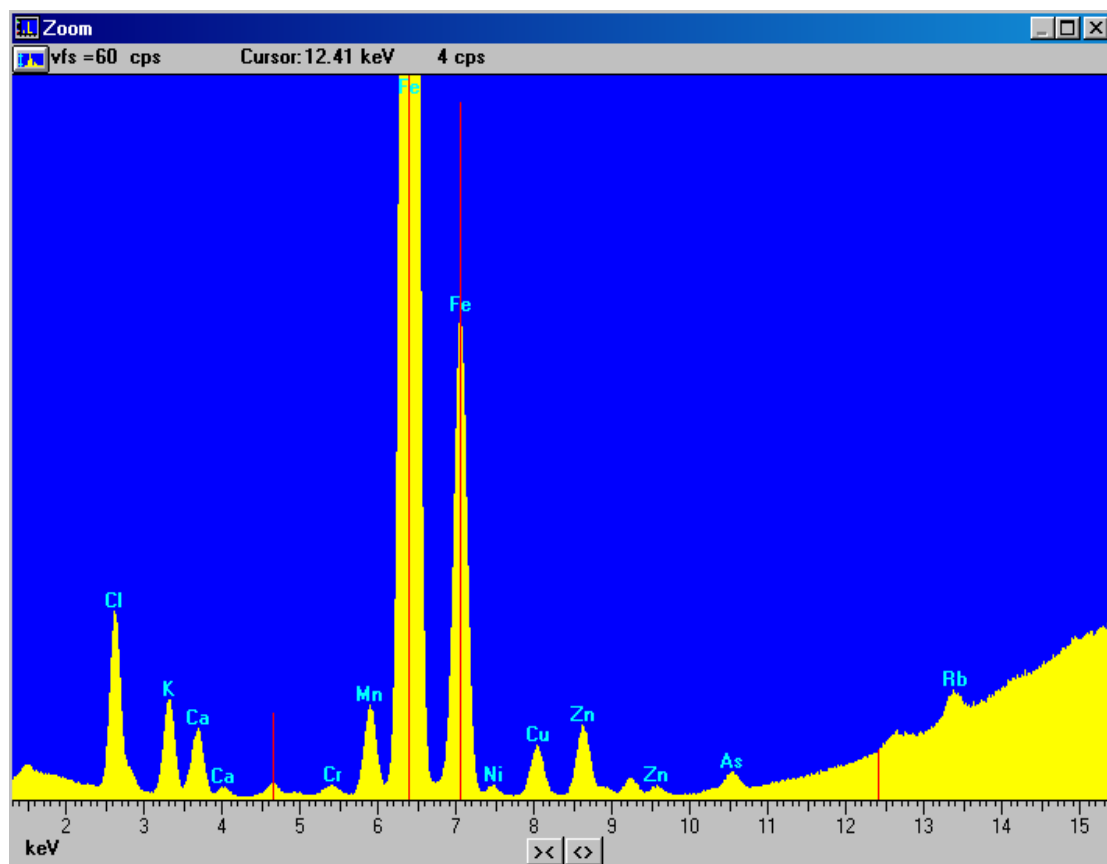
ภาพที่ 16 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ดินโดยวิธีการวาวรังสีเอกซ์

a = กราฟมาตรฐานสังกะสี

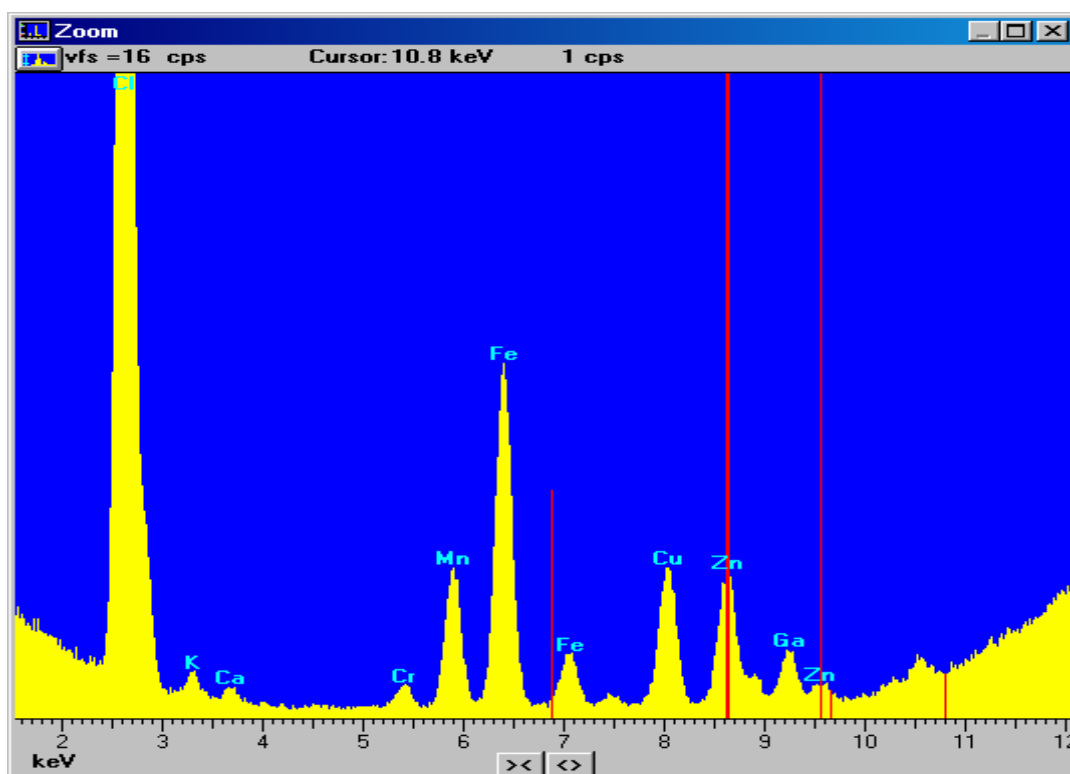
b = กราฟมาตรฐานเหล็ก



ภาพที่ 17 สเปกตรัมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในกระดวยกรองเปล่าที่ได้จากการวิเคราะห์
โดยเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์



ภาพที่ 18 สเปกตรัมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างดินทดลอง ที่ได้จากการวิเคราะห์
โดยเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์



ภาพที่ 19 สเปกตรัมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างแผ่น ที่ได้จากการวิเคราะห์
โดยเครื่องวิเคราะห์การาวรังสีเอกซ์

2. ความเข้มข้นของสังกะสี และเหล็กในตัวอย่างดิน

จากการสุ่มตัวอย่างดินหลังจากการย่อยด้วยกรดผสม ดังที่กล่าวมาแล้ว ทั้ง 2 แปลง แปลง
ละ 9 ตัวอย่าง ทั้งหมด 18 ตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของสังกะสี และเหล็ก โดยวิธี AAS
กับวิธี XRF ผลการวิเคราะห์ดินในแปลงทดลองที่ 1 แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์ด้วยวิธี AAS
สามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นของสังกะสีได้ในช่วง 233.2-309.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนัก
(ตารางที่ 16) ขณะที่วิธี XRF สามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นของสังกะสีได้ในช่วง 234.1-311.2
มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนัก โดยมีผลต่างความเข้มข้นของสังกะสีจากการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธีอยู่
ในช่วง 0.9-7.8 ส่วนความเข้มข้นของเหล็กนั้นวิธี AAS สามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็กได้
ในช่วง 37,016.1-44,333.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนัก และวิธี XRF วิเคราะห์ความเข้มข้น
ของเหล็กได้ในช่วง 19,417.7-24,857.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนัก โดยมีผลต่างความเข้มข้น
ของเหล็กจากการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธีอยู่ในช่วง 17,598.4-19,476.3

ส่วนผลการวิเคราะห์ดินในแปลงทดลองที่ 2 แสดงในตารางที่ 17 จะเห็นได้ว่า การวิเคราะห์ดินด้วยวิธี AAS และวิธี XRF สามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นของสังกะสีได้ในช่วง 201.8-303.8 และ 203-307.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยมีผลต่างความเข้มข้นของสังกะสีที่วิเคราะห์ได้จากทั้ง 2 วิธีช่วง 1.3-4.0 สามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็กได้ในช่วง 12,667.0-19,343.4 และ 7,696.2-12,866.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีผลต่างความเข้มข้นของเหล็กที่วิเคราะห์ได้จากทั้ง 2 วิธีอยู่ในช่วง 3,584.1-6,128.5

จากข้อมูลการวิเคราะห์ดินด้วยวิธี AAS กับ XRF จะเห็นได้ว่า ทั้งสองแปลงทดลองให้ผลวิเคราะห์ที่สอดคล้องกัน โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี XRF ให้ค่าความเข้มข้นของสังกะสีมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี AAS แต่ให้ค่าความเข้มข้นเหล็กน้อยกว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี AAS ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจาก ขั้นตอนการเตรียมสารมาตรฐาน สำหรับวิเคราะห์ด้วยวิธี XRF ทั้งนี้ในการเตรียมสารมาตรฐาน เพื่อวิเคราะห์โลหะหนักในดินนั้น ใช้ความเข้มข้นของสารมาตรฐานน้อยเกินไป ไม่สอดคล้องกับความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นมาก ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อ การปรับเทียบความเข้มข้นในสารตัวอย่างได้

3. กราฟมาตรฐานเพื่อวิเคราะห์ตัวอย่างแฝก

เตรียมสารละลายมาตรฐานสังกะสีจาก $Zn(NO_3)_2$ ทำให้ความเข้มข้นของสังกะสี เท่ากับ 1, 2, 3, 4 และ 5 ppm และสารละลายมาตรฐานเหล็กจาก $Fe(NO_3)_3$ ให้ความเข้มข้นของเหล็ก เท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm ใช้สารละลายทั้ง 2 ชุด ในการทำกราฟมาตรฐาน เพื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่างแฝก โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง AAS และวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่อง XRF จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารมาตรฐาน สำหรับการวิเคราะห์ดินโดย AAS และความสัมพันธ์ของความเข้มรังสีเอกซ์กับความเข้มข้นของสารมาตรฐาน สำหรับการวิเคราะห์ดินโดย XRF ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นดังสมการ (9) –(12)

ตารางที่ 16 ความเข้มข้นของสังกะสี (Zn) และเหล็ก (Fe) ในดินของแปลงทดลองที่ 1 เมื่อวิเคราะห์โดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) กับวิธีการวาวรังสีเอกซ์ (XRF)

ชนิดของโลหะหนัก	ตัวอย่างดิน	ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ¹		ผลต่างของ 2 วิธี
		AAS	XRF	
Zn	1	250.6±0.9	258.4±5.5	-7.8
	2	287.9±0.4	292.4±4.3	-4.5
	3	309.7±0.6	311.2±5.3	-1.5
	4	261.6±3.7	263.5±1.2	-1.9
	5	266.1±0.8	269.5±3.0	-3.4
	6	241.5±0.6	243.7±0.3	-2.2
	7	246.7±3.0	249.3±2.1	-2.6
	8	241.0±0.9	243.5±1.5	-2.5
	9	233.2±0.7	234.1±0.2	-0.9
Fe	1	39,448.9±0.3	20,884.9±14.2	+18,564.0
	2	44,333.9±2.3	24,857.6±4.1	+19,476.3
	3	41,851.8±0.1	22,578.0±10.6	+19,273.8
	4	42,125.5±1.6	23,955.0±2.0	+18,170.5
	5	38,993.4±1.2	20,806.7±2.2	+18,186.7
	6	38,846.7±0.8	20,507.3±18.4	+18,339.4
	7	38,557.1±2.2	20,360.2±3.0	+18,196.9
	8	42,585.8±2.0	24,172.2±6.6	+18,413.6
	9	37,016.1±0.9	19,417.7±15.1	+17,598.4

¹ ความเข้มข้นเฉลี่ย ± Standard Error (S.E)

ตารางที่ 17 ความเข้มข้นของสังกะสี (Zn) และเหล็ก (Fe) ในดินของแปลงทดลองที่ 2 เมื่อวิเคราะห์โดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) กับวิธีการวาวรังสีเอกซ์ (XRF)

ชนิดของโลหะหนัก	ตัวอย่างดิน	ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ¹		ผลต่างของ 2 วิธี
		AAS	XRF	
Zn	1	303.8±0.2	307.7±12.2	-4.0
	2	265.7±0.6	267.2±6.2	-1.5
	3	292.5±0.5	294.4±4.2	-1.9
	4	225.9±0.3	229.2±7.2	-3.3
	5	254.2±0.8	256.1±2.0	-2.0
	6	229.4±0.3	231.5±2.5	-2.1
	7	228.8±0.7	231.3±9.2	-2.5
	8	201.8±1.7	203.0±2.7	-1.3
	9	224.3±0.4	226.7±5.7	-2.5
Fe	1	18,997.1±2.4	12,866.2±9.5	+6,128.5
	2	18,544.7±4.6	12,491.2±3.7	+6,058.0
	3	19,343.4±4.3	13,734.3±8.2	+5,604.8
	4	12,667.0±2.7	8,920.2±9.9	+3,744.1
	5	13,572.9±1.0	9,989.7±5.2	+3,584.1
	6	17,554.3±2.4	11,188.0±9.5	+6,368.7
	7	13,474.0±2.9	9,687.4±12.5	+3,789.5
	8	12,793.0±0.5	7,696.2±5.2	+5,096.3
	9	13,290.4±4.0	9,094.4±13.3	+4,200.0

¹ ความเข้มข้นเฉลี่ย ± Standard Error (S.E)

กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์สังกะสีและเหล็กโดยวิธี AAS [ภาพที่ 20 (a, b)] แสดงดังสมการ

$$\text{สังกะสี : } y = 0.1633x + 0.0375 \quad R^2 = 0.9917 \quad (9)$$

$$\text{เหล็ก : } y = 0.0150x + 0.0898 \quad R^2 = 0.9465 \quad (10)$$

เมื่อ y = ค่าการดูดกลืนแสง

x = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานในหน่วย ppm

R^2 = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสง (y) กับความเข้มข้น(x)

กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์สังกะสีและเหล็ก โดยวิธี XRF [ภาพที่ 21 (a, b)] แสดงดังสมการ

$$\text{สังกะสี : } y = 641.71x - 284.29 \quad R^2 = 0.9552 \quad (11)$$

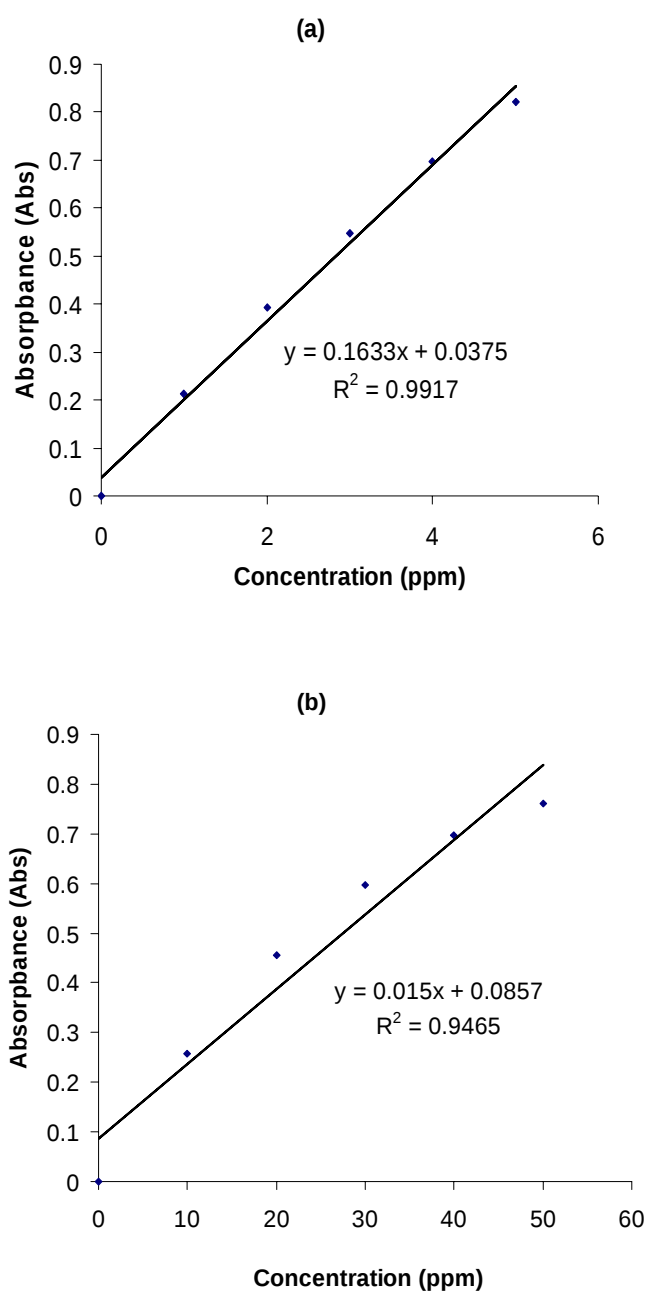
$$\text{เหล็ก : } y = 578.4x - 1173.3 \quad R^2 = 0.8858 \quad (12)$$

เมื่อ y = ความเข้มของรังสีเอกซ์

x = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานในหน่วย mg/ml

R^2 = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความเข้มของรังสีเอกซ์ (y) และความเข้มข้น(x)

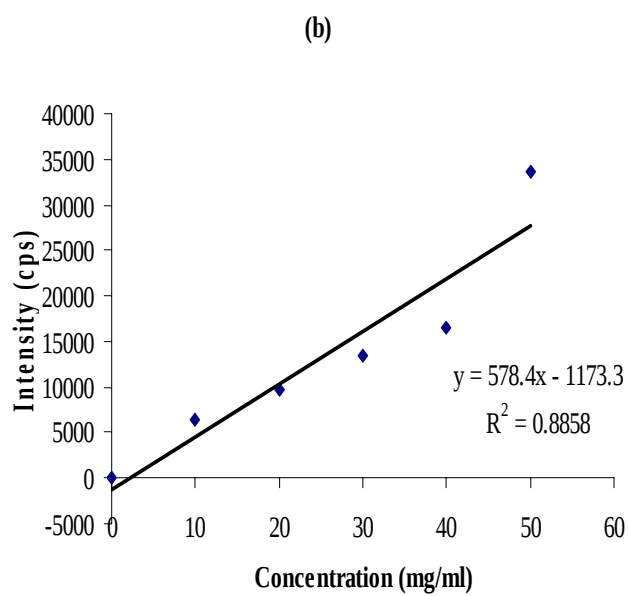
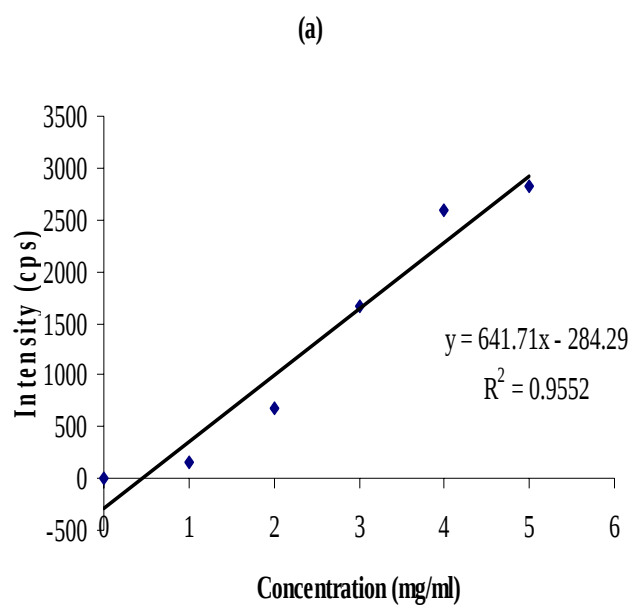
จากการสร้างกราฟมาตรฐานสังกะสี และเหล็ก เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างแฝก จะเห็นได้ว่า กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี AAS แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน [ภาพที่ 20 (a, b)] และกราฟมาตรฐานจากวิธี XRF ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน [ภาพที่ 21 (a)] ได้กราฟมีความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ดี คือ ค่า $R^2 > 0.9000$ แสดงให้เห็นว่า กราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้นสามารถใช้เปรียบเทียบเพื่อหาความเข้มข้นของสังกะสีและเหล็กในการวิเคราะห์ตัวอย่างแฝกได้เป็นอย่างดี (หญิงเล็ก, 2534) ยกเว้นกราฟมาตรฐานเหล็กสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี XRF [ภาพที่ 21 (b)] ที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำกว่า 0.9000 ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยจากวิธีวิเคราะห์ XRF หรือค่าพื้นหลังที่มีค่าสูง ดังภาพที่ 17 อาจส่งผลกระทบต่อการวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ในตัวอย่างแฝก (ภาพที่ 19)



ภาพที่ 20 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์แผลกโดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

a = กราฟมาตรฐานสังกะสี

b = กราฟมาตรฐานเหล็ก



ภาพที่ 21 กราฟมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์แฟก โดยวิธีการวาวรังสีเอกซ์
a = กราฟมาตรฐานสังกะสี
b = กราฟมาตรฐานเหล็ก

4. ความเข้มข้นของสังกะสีและเหล็กในดินแฟก

จากการสุ่มตัวอย่างแฟก 15 ตัวอย่าง ในแปลงทดลองที่ 1 เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของสังกะสี โดยวิธี AAS กับวิธี XRF (ตารางที่ 18) แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นสังกะสีอยู่ระหว่าง 33.9-40.0 และ 25.6-26.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดยมีผลต่างความเข้มข้นของสังกะสีจากการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธี อยู่ในช่วง 5.3-13.6

การวิเคราะห์ ค่าความเข้มข้นของเหล็กในดินแฟกของแปลงทดลองที่ 1 แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี AAS และวิธี XRF มีความเข้มข้นของเหล็กอยู่ระหว่าง 234.6-289.3 และ 114.5-118.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนัก ตามลำดับ (ตารางที่ 19) โดยมีผลต่างความเข้มข้นของเหล็กจากการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธี อยู่ในช่วง 103.1-172.8

ในแปลงทดลองที่ 2 เมื่อทำการสุ่มตัวอย่างแฟก 15 ตัวอย่าง มาวิเคราะห์ความเข้มข้นของสังกะสี และเหล็ก แสดงให้เห็นว่า ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสังกะสีจากวิธี AAS และ XRF มีค่าความเข้มข้นของสังกะสีอยู่ระหว่าง 59.5-78.4 และ 25.5-26.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนัก ตามลำดับ (ตารางที่ 20) โดยมีผลต่างความเข้มข้นของสังกะสีจากการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธี อยู่ในช่วง 33.8-52.3

ส่วนค่าความเข้มข้นของเหล็กแฟกในตารางที่ 21 สำหรับแปลงทดลองที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธี AAS และ XRF มีค่าอยู่ระหว่าง 252.2-303.9 และ 114.1-117.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยมีผลต่างความเข้มข้นของเหล็กจากการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธีอยู่ในช่วง 137.5-186.6

เมื่อพิจารณาค่าความเข้มข้นของสังกะสีและเหล็กในแฟกของแปลงทดลองที่ 1 และ 2 จะเห็นว่า ทั้ง 2 แปลงให้ค่าความเข้มข้นของสังกะสีและเหล็กที่ใกล้เคียงกัน และในการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธี ให้ค่าที่สอดคล้องกันทั้ง 2 แปลงทดลอง โดย XRF ให้ค่าความเข้มข้นของสังกะสี และเหล็กในแฟก น้อยกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี AAS ทั้งนี้ อาจมีสาเหตุจาก การเตรียมสารตัวอย่างที่ไม่ดีพอในการวิเคราะห์ด้วยวิธี XRF เพื่อที่จะลดผลของเมทริกซ์ให้น้อยลง หรือในการเตรียมสารละลายมาตรฐานที่ไม่ครอบคลุมถึงความเข้มข้นของสังกะสี และเหล็กในสารตัวอย่าง อาจส่งผลต่อการวัดความเข้มข้นของรังสีได้

ตารางที่ 18 ความเข้มข้นของสังกะสี (Zn) ในดินแผ่นของแปลงทดลองที่ 1 เมื่อวิเคราะห์โดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) กับวิธีการวาวรังสีเอกซ์ (XRF)

ชนิดของ โลหะหนัก	ตัวอย่างแผ่น	ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ¹		ผลต่างของ 2 วิธี
		AAS	XRF	
Zn	1	38.5±0.4	25.9±0.2	+12.6
	2	39.9±0.3	26.5±0.2	+13.3
	3	35.4±0.4	25.8±0.2	+9.6
	4	35.3±0.3	25.7±0.0	+9.6
	5	35.2±0.3	25.6±0.0	+9.6
	6	38.8±0.6	25.9±0.1	+12.9
	7	39.1±0.2	25.9±0.1	+13.2
	8	39.3±0.4	25.9±0.0	+13.1
	9	38.8±0.2	26.2±0.1	+13.6
	10	34.7±0.8	25.8±0.3	+9.5
	11	40.0±0.3	26.6±0.0	+13.5
	12	35.1±0.2	25.8±0.3	+9.6
	13	36.4±0.3	25.8±0.1	+10.4
	14	39.4±0.1	26.0±0.2	+13.4
	15	33.9±0.2	25.6±0.1	+5.3

¹ ความเข้มข้นเฉลี่ย ± Standard Error (S.E)

ตารางที่ 19 ความเข้มข้นของเหล็ก (Fe) ในดินแผ่นของแปลงทดลองที่ 1 เมื่อวิเคราะห์โดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) กับวิธีการวาวรังสีเอกซ์ (XRF)

ชนิดของ โลหะหนัก	ตัวอย่างแผ่น	ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ¹		ผลต่างของ 2 วิธี
		AAS	XRF	
Fe	1	235.9±15.1	116.6±0.3	+119.3
	2	244.9±0.2	114.7±0.2	+129.4
	3	248.3±1.4	116.1±0.1	+157.1
	4	257.8±1.9	115.7±0.0	+113.2
	5	245.1±1.2	114.5±0.1	+113.1
	6	277.8±0.3	116.8±0.3	+118.4
	7	289.3±0.4	118.8±0.3	+170.9
	8	264.5±1.1	116.2±0.1	+121.9
	9	237.8±1.7	114.8±0.2	+108.6
	10	234.6±0.7	114.5±0.7	+108.0
	11	255.6±0.6	115.2±0.1	+103.1
	12	285.3±0.4	117.1±0.1	+136.6
	13	255.1±1.3	115.4±0.6	+172.8
	14	252.2±2.4	115.3±0.3	+136.9
	15	261.2±1.4	117.1±0.6	+144.1

¹ ความเข้มข้นเฉลี่ย ± Standard Error (S.E)

ตารางที่ 20 ความเข้มข้นของสังกะสี (Zn) ในดินแปลงของแปลงทดลองที่ 2 เมื่อวิเคราะห์โดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) กับวิธีการวาวรังสีเอกซ์ (XRF)

ชนิดของ โลหะหนัก	ตัวอย่างแปลง	ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ¹		ผลต่างของ 2 วิธี
		AAS	XRF	
Zn	1	69.6±1.6	25.8±0.0	+43.8
	2	74.8±0.1	25.7±0.1	+49.1
	3	78.4±0.4	26.1±0.1	+52.3
	4	77.2±0.3	26.9±0.0	+51.3
	5	73.4±0.7	25.8±0.1	+47.6
	6	74.5±2.0	25.6±0.0	+48.9
	7	77.1±0.4	25.6±0.1	+51.5
	8	71.2±3.4	25.8±0.1	+45.4
	9	61.6±4.1	25.8±0.1	+35.8
	10	76.2±2.1	25.9±0.1	+50.3
	11	73.3±0.4	25.9±0.1	+47.4
	12	59.5±0.0	25.7±0.1	+33.8
	13	63.7±4.0	25.6±0.1	+38.1
	14	63.1±5.0	25.9±0.1	+37.2
	15	66.3±0.1	25.5±0.1	+40.8

¹ ความเข้มข้นเฉลี่ย ±Standard Error (S.E)

ตารางที่ 21 ความเข้มข้นของเหล็ก (Fe) ในดินแผ่นของแปลงทดลองที่ 2 เมื่อวิเคราะห์โดยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) กับวิธีการวาวรังสีเอกซ์ (XRF)

ชนิดของ โลหะหนัก	ตัวอย่างแผ่น	ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ¹		ผลต่างของ 2 วิธี
		AAS	XRF	
Fe	1	300.7±0.6	115.6±0.1	+185.1
	2	301.1±1.0	116.2±0.8	+184.9
	3	300.1±0.1	116.5±0.2	+183.6
	4	253.4±0.7	115.7±0.1	+137.7
	5	299.8±0.3	115.5±0.2	+184.3
	6	256.7±0.4	114.7±0.3	+174.0
	7	300.1±1.1	114.3±0.5	+185.8
	8	288.9±0.2	115.9±0.4	+182.7
	9	290.5±0.8	115.9±0.1	+181.2
	10	287.9±0.6	115.4±0.4	+167.0
	11	303.9±0.3	117.3±0.1	+186.6
	12	287.9±1.2	115.4±0.4	+170.9
	13	252.2±2.4	114.7±0.4	+137.5
	14	297.0±2.0	115.8±0.3	+182.3
	15	256.5±0.6	114.1±0.4	+142.4

¹ ความเข้มข้นเฉลี่ย ± Standard Error (S.E)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการปลูกแฝก 4 แหล่งพันธุ์ ได้แก่ แหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 นครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ เพื่อศึกษาความสามารถในการเจริญเติบโต การดูดซึมโลหะหนักของแฝก และอิทธิพลของปุ๋ยหมักที่มีต่อการเจริญเติบโตของแฝกที่ปลูกในดินเหมืองแร่สังกะสี ที่มีความเข้มข้นของ สังกะสี แคดเมียม และเหล็ก สูงเกินค่าที่ใช้ประเมินความเสี่ยงของการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน รวมทั้งศึกษาเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โลหะหนักในดิน และพืช โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. แปลงทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นพื้นที่ลาดชัน ส่วนแปลงทดลองที่ 2 ซึ่งเป็นพื้นที่ราบ ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกัน ในด้านการเจริญเติบโต การดูดซึมธาตุอาหารพืชและโลหะหนัก โดยแฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีการเจริญเติบโตดีที่สุด และยังสามารถดูดซึมธาตุอาหารพืช และโลหะหนักได้สูงสุด
2. แฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีการเจริญเติบโตด้านความสูงและน้ำหนักแห้งสูงสุด และสูงกว่าแหล่งพันธุ์อื่น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แหล่งพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์ มีการแตกกอสูงสุด แตกต่างกับแหล่งพันธุ์อื่น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
3. แฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักมีความสูง น้ำหนักแห้ง ปริมาณธาตุอาหารพืช และโลหะหนักในต้นแฝกสูงสุด และสูงกว่าแฝกที่ไม่ได้รับปุ๋ยหมัก โดยแฝกที่ได้รับปุ๋ยหมักอัตรา 8 และ 4 ตันต่อไร่ ให้ผลไม่แตกต่างกันทางสถิติ
4. แฝกแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 สามารถดูดซึมธาตุอาหารพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ได้สูงสุด เท่ากับ 2,897, 545 และ 2,355 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ (แปลงทดลองที่ 1) และ 5,273, 494 และ 5,787 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ (แปลงทดลองที่ 2)

5. แผลงแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 สามารถดูดซึมโลหะหนัก ได้แก่ สังกะสี แคดเมียม และ เหล็ก ไว้ในดินได้สูงสุด เท่ากับ 13.3, 0.4 และ 63.7 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ (แปลงทดลองที่ 1) และ 29.2, 0.7 และ 99.7 กรัมต่อไร่ ตามลำดับ (แปลงทดลองที่ 2)

6. การวิเคราะห์โลหะหนักโดยวิธีการวาวรังสีเอกซ์ (XRF) ให้ผลการวิเคราะห์แตกต่างจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี (AAS) อาจเนื่องมาจากพื้นหลังที่มีค่าสูง เทคนิคการเตรียมตัวอย่างที่ไม่ดีพอ และการเตรียมสารละลายมาตรฐานที่ไม่ครอบคลุมถึงความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ซึ่งอาจส่งผลต่อการวัดความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ได้ ขณะที่ XRF เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ได้หลาย ๆ ธาตุพร้อมกัน ซึ่งจำเป็นต้องมีการพัฒนาเทคนิคในการเตรียมสารตัวอย่าง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ ได้ดีต่อไป

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ เป็นการทดลองในพื้นที่เมืองแร่วังสะกีสี่ ของบริษัทผาแดง อินคัสทรี จำกัด (มหาชน) อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ผลการทดลอง พบว่า แผลงแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 มีการเจริญเติบโตในดินเมืองแร่วังสะกีสี่ได้ดี และยังสามารถดูดซึมธาตุอาหารพืช และโลหะหนักได้ดีกว่านครสวรรค์ สุราษฎร์ธานี และประจวบคีรีขันธ์ ดังนั้น แผลงแหล่งพันธุ์กำแพงเพชร-2 จึงเหมาะสมที่จะนำมาปลูกในดินเมืองแร่วังสะกีสี่ ทั้งนี้ ในทางปฏิบัติ อาจใส่ปุ๋ยหมักในอัตรา 4 ตันต่อไร่ เพื่อช่วยเพิ่มอินทรียวัตถุในดิน และส่งเสริมการเจริญเติบโตของแผล นอกจากนี้ ในการปลูกแผล ควรมีการดูแลให้ดี เพื่อป้องกันการรุกรานของสัตว์ ที่อาศัยอยู่บริเวณที่ปลูกแผล ควรเลือกฤดูในการปลูกแผลให้เหมาะสมกับแหล่งพันธุ์ที่จะนำมาปลูก ยิ่งช่วงแรกของการปลูกแผล ควรมีการให้น้ำอย่างสม่ำเสมอ เพื่อช่วยให้แผล ไม่เหี่ยวเฉา และฟื้นตัวได้ดี สำหรับการวิเคราะห์โลหะหนักในดินและพืช โดยวิธี XRF ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ ได้ ควรเพิ่มปริมาณสารตัวอย่างที่หยดลงบนกระดาษกรองให้มากขึ้น หรือในขั้นตอนของการปรับปริมาตรหลังการย่อยด้วยกรด ไม่ควรปรับปริมาตรมากเกินไป เพราะอาจทำให้ความเข้มข้นของสารตัวอย่างเจือจางลง ซึ่งอาจส่งผลต่อการวัดความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ สำหรับการเตรียมสารมาตรฐานควรครอบคลุมความเข้มข้นของสารตัวอย่าง เพื่อให้สามารถวัดความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ได้อย่างถูกต้องที่สุด ขณะที่วิธี AAS การเตรียมสารตัวอย่างโดยการย่อยด้วยกรดผสม ควรให้การย่อยสมบูรณ์ที่สุด เพื่อให้ค่าการวิเคราะห์มีความถูกต้องที่สุด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี. 2542. แผนที่และข้อมูลแหล่งแร่ของไทยชุดแร่โลหะของประเทศไทย

ฉบับที่ 2. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2535. ความรู้เรื่องแฟก. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์,

กรุงเทพฯ.

_____. 2537. ความรู้เรื่องแฟก. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

_____. 2541ก. ความรู้เรื่องแฟก. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

_____. 2541ข. ปุ๋ยอินทรีย์และการใช้ประโยชน์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. สำนักงานพัฒนา

ที่ดินเขต 5 กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, ขอนแก่น.

_____. 2543. ความรู้เรื่องแฟก. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

กรมวิชาการเกษตร. 2546. ผลงานวิชาการประจำปี 2544 เล่มที่ 3. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตร

และสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

_____. 2548. ปุ๋ยอินทรีย์: การผลิต การใช้ มาตรฐานและคุณภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1.

สำนักวิจัยและพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

เกษมศรี ชับซ้อน. 2544. คู่มือวิเคราะห์ดินและพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

คณาจารย์ภาคปฐพีวิทยา. 2541. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 8. สำนักพิมพ์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ชัยฤกษ์ สุวรรณรัตน์. 2536. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 177 น.

- ทิพวรรณ สติธิรังสรรค์. 2547. **ปุ๋ยหมัก ดินหมัก และปุ๋ยน้ำชีวภาพ: เพื่อการปรับปรุงดินโดยวิธีเกษตรธรรมชาติ**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- ธนิยา เจตยานุกุล. 2539. **ความเป็นไปได้ของการใช้หญ้าแฝกจากแหล่งพันธุ์ต่าง ๆ ในการบำบัดน้ำทิ้ง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ. 2545. **วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นวลศรี นวัตกรรมวงศ์. 2535. **อะตอมมิคแอบซอร์ปชันและอิมิชชันสเปกโทรสโกปี**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- นิตยา ตันมณี และ จุไร ทองมาก. 2537. **การปนเปื้อนของธาตุแคลเซียมในดินในพื้นที่บางแห่งของประเทศไทย**. กองวิเคราะห์ดิน กรมพัฒนาที่ดิน, กรุงเทพฯ.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2547. **สเปกโทรสโกปีด้านการวิเคราะห์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ปฐพีชล วาอุคคี. 2548. **ดินและปุ๋ย**. พิมพ์ครั้งที่ 6. สำนักพิมพ์ฐานเกษตรกรรม, นนทบุรี.
- ประพิศ แสงทอง. 2544. การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในพืช, หน้า 113-116. ใน **คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.
- ประไพ ชัยโรจน์ และ วนิดา โนบรรเทา. 2544. การย่อยสลายและการปลดปล่อยธาตุอาหารพืชจากหญ้าแฝก. **วารสารดินและปุ๋ย** 23(1): 1-11.
- ประภาศรี จงประดิษฐ์นันท์. 2544ก. การวิเคราะห์โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมในพืช, หน้า 117-123. ใน **คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

ประกาศรี จงประดิษฐ์นันท์. 2544ข. การวิเคราะห์เบสที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน, หน้า 24-32. ใน **คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

ปรีดา พากเพียร และ พิชิต พงษ์สกุล. 2535. **บทบาทของธาตุอาหารรองและธาตุอาหารเสริมที่มีต่อผลผลิตและคุณภาพของพืชสวน**. กลุ่มงานวิจัยเคมีดิน กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

พิชิต พงษ์สกุล และ สุรสิทธิ์ อรรถจารุสิทธิ์. 2542. การประเมินความปนเปื้อนของธาตุโลหะหนักในดิน. **วารสารดินและปุ๋ย** 21(2): 71-82.

_____ และ R. W. Simmons. 2544. การวิเคราะห์สารหนู แคดเมียม ตะกั่ว และนิกเกิลในดิน, หน้า 98-107. ใน **คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

พิมล เรียงวัฒนา และ ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2525. **เคมีสถานะสิ่งแวดล้อม**. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ. 213 น.

มะลิวัลย์ เทพพุลผล. 2544. การวัดสภาพนำไฟฟ้าของดิน, หน้า 11-17. ใน **คู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

มุกดา สุขสวัสดิ์. 2543. **ปุ๋ยและการใช้ปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2544. **ความอุดมสมบูรณ์ของดิน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2547. **ชุดคู่มือการเกษตร: ปุ๋ยอินทรีย์**. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์บ้านและสวน, กรุงเทพฯ.

แม่น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. 2539. **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ**. โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ไมตรี สุททจิตต์. 2531. สารพิษรอบตัวเรา. โรงพิมพ์ดาราคอมพิวเตอร์กราฟิค, เชียงใหม่.

ยงยุทธ โอสดสภา. 2543. ธาตุอาหารพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2546. ธาตุอาหารพืช. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ยุพดี เสตพรณ. 2544. ชีวิตกับสิ่งแวดล้อม. คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์, สถาบันราชภัฏเพชรบุรีวิทยาเขตกรณ, กรุงเทพฯ.

วรพจน์ รัมพนินิล. 2543. ปุ๋ยและการใช้ปุ๋ย. สำนักพิมพ์ยูไนเต็ดบุ๊กส์, กรุงเทพฯ.

ศิริลักษณ์ กล้าการขาย และ ธนชัย กองแก้ว. 2005. การบำบัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนในดินโดยใช้หญ้าแฝก. **31st Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology**, 18-20 October 2005.

ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2540. ภาวะมลพิษ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุทธิรักษ์ ตั้งเรืองเกียรติ. 2548. การใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารพืชและโลหะหนักในหญ้าแฝกที่ปลูกในน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

_____, นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ และ ฤทธิ มีสัตย์. 2549. ศักยภาพการใช้แฝกในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. วารสารดินและปุ๋ย.

สัมพันธ์ วงศ์นาวา. 2541. เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรเมตรีแบบกระจายพลังงาน. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

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

สุธิลา ตูลยะเสถียร, โกศล วงศ์สวรรค์ และ สติต วงศ์สวรรค์. 2544. มลพิษสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. รวมสาส์น, กรุงเทพฯ.

สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. 2545. คู่มือสารานุกรมเรื่องหญ้าแฝกกับการอนุรักษ์ดินและน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3. เพชรรุ่งการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

สำนักนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม. ม.ป.ป. 2543. รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2541. โรงพิมพ์พิทักษ์อักษร, กรุงเทพฯ.

_____. 2545. รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2544. โรงพิมพ์พิทักษ์อักษร, ปทุมธานี.

หญิงเล็ก พงศ์พยัคฆ์. 2534. เทคนิคและปัญหาบางประการเกี่ยวกับการวิเคราะห์ดินด้วยรังสีเอกซ์, ใน พงนิษฐ์ มอญเจริญ และ ชูจิตต์ สงวนทรัพย์ากร, บรรณาธิการ. รายงานการประชุมสัมมนาเชิงปฏิบัติการ เรื่อง Standardization and workshop training on chemical analysis of soils วันที่ 11-18 พฤศจิกายน 2534. กรมพัฒนาที่ดิน, กรุงเทพฯ.

อนุรักษ์ บรรณศักดิ์. 2544. การวิเคราะห์ตะกั่วและสังกะสีในหญ้าแฝกที่ปลูกบนทางแร่ตะกั่วและสังกะสีโดยใช้เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ, สุรัชย์ หมั่นสังข์ และ รุจิเรจ ราชบุรี. 2549. ของการเติมธาตุอลูมิเนียมในดินและปุ๋ยหมักฟางข้าวในการปลูกข้าว. น. 232-239. ใน เรื่องเติมการประชุมวิชาการ ครั้งที่ 44 (สาขาพืช). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Alloway, B.J. 1990. **Heavy Metals in Soils**. Chapman & Hall, London.

_____. 1995. Cadmium, pp. 122-147. *In* **B. J. Alloway, ed. Heavy Metals in Soils, 2nd ed.** Blackie Academic and Professional, London.

APHA. 1993. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, Washington, D.C.

Arena, J.M. 1976. **Poisoning, 3rd ed.** Charles C. Thomas Publisher, Springfield.

Baker, D.E. and N.H. Suhr. 1982. Atomic absorption and flame emission spectrometry, pp. 13-27. *In* A.L. Page *et al.*, eds. **Method of Soil Analysis, Part 2**. Amer. Soc. Agron Inc., Madison, Wisconsin, U.S.A.

Boardman, R. and D.O. McGuire. 1990. The role of zinc in forestry I. Zinc in forest environments, ecosystems and tree nutrition. **Forest Ecol. Mgmt.** 37: 167-205.

Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen, pp. 1149-1178. *In* C.A. Black *et al.*, eds. **Method of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties**. Amer. Soc. Agron. Inc., Publ., Madison, Wisconsin.

Chen, H., C.R. Zheng, C. Tu and Z.G. Shen. 2000. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metal. **Chemosphere** 41: 229-234.

Cheney, R.L., P.G. Reeves and J.S. Angle. 2001. Rice plant nutritional and human nutritional characteristics roles in human Cd toxicity, pp. 288-289, *In* W.J. Horst *et al.*, eds. **Plant Nutrition: Food Security and Sustainability of Agro-ecosystems through Basis and Applied Research**. Kluwer Academic Publ., Dordrecht.

Donald, L.W. and D.J. Trantolo. 1994. **Remediation of Hazardous Waste Contaminated Soils**. Dekker, New York.

Ebdon, L., E.H. Evans, A.S. Fisher and S.J. Hill. 1998. **An Introduction to Analytical Atomic Spectrometry**. John Wiley & Sons Ltd., London, UK.

Fisica. 2005. **Frenamento**. Available Source: <http://www.fisici.indivia.net/frenamento.html>, March 31, 2005.

Friberg, L.M.P., G.F. Nordberg and T. Kjellstrom. 1976. **Cadmium in the Enviroment**. Academic Press Inc., New York. 118 p.

John, H. 1978. Uptake of soil application cadmium and its distribution in radishes. **Can. J. Plant Sci.** 52: 715-719.

Johnes, A.A. 1982. X-ray Fluorescence spectrometry, pp. 85-121. *In* Page A.L. *et al.*, eds. **Method of Soil Analysis, Part 2**. Amer. Soc. Agron. Inc., Madison, Wisconsin, U.S.A.

Johansson, S.A.E. and J.L. Cambell. 1988. **PIXE: A Novel Technique for Elemental Analysis**. John Wiley & Sons, New York.

Land Classification Division and FAO Project Staff. 1973. **Soil Interpretation Handbook for Thailand**. Dept. of Land Development, Bangkok.

Lindsay, W.L. and W.A. Norwell. 1987. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. **Soil Sci. Soc. Amer. J.** 42: 421-428.

Marschner, H. 1995. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 2nd ed. Academic Press. New York.

- McNeely, R. N., V. P. Neimanis and L. Dwyer. 1979. **Water Quality Sourcebook a Guide to Water Quality Parameter.** Inland Water Directorate, Water Quality Branch, Ottawa.
- Nabbs, C. L. and D. W. Pearce. 1976. **The economics of stock pollutants. The example of cadmium.** Intern. J. Environ. Studies 8: 245 – 255.
- Olsen, S.R. and L.E. Sommer. 1982. Phosphorus. pp. 403-430. In A.L. Page *et al.*, eds. **Method of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties.** 2nd ed. Amer. Soc. Agron. Inc., Madison, Wisconsin.
- Pendias, A.K. and H. Pendias. 1992. **Trace Element in Soils and Plants.** 2nd ed. CRC Press, Inc., New York.
- _____ and H. Pendias. 2001. **Trace Element in Soils and Plants.** 3rd ed. CRC Press, New York.
- Reilly, C. 1980. **Metal Contamination of Food.** Applied Science Publishers Ltd., London.
- Roongtanakiat, N. and P. Chairroj. 2001. Uptake potential of some heavy metal by vetiver grass. **Kasetsart J. (Nat.Sci.)** 35: 46-50.
- _____, T. Nirunrach, S. Chanyotha and D. Hengchavanich. 2002. Uptake of heavy metals in landfill leachate by vetiver grass. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)** 37: 168-175.
- Shu, W.S., H.P. Xia, Z.Q. Zhang, C.Y. Lan and M.H. Wong. 2002. Use of vetiver and three other grass for re-vegetation of Pb/Zn mine tailing at Lechang, Guang province: a field experiment, pp. 56-63. In **The 2nd International Conference on Vetiver Environment.** Office of the Royal Development Projects Board, Bangkok.

- Sunderman, F.E., Jr. 1971. Metal carcinogenesis in experimental animals. *Fed. Cosmet. Toxicol.* 9: 105-120.
- Tertan, W. 2005. **Image X-ray emission**. Available Source: http://www.surf.agri.ch/imaging/XR/imag_xr_emission.htm, March 31, 2005.
- Truong, P.N. 1999. Vetiver grass technology for mine rehabilitation. **Pacific Rim Vetiver Network Tech. Bull. No. 1999/2**, Bangkok.
- _____ and D. Baker. 1998. Vetiver grass system for environmental protection. **Pacific Rim Vetiver Network Tech. Bull. No. 1998/1**, Bangkok.
- _____ and J. Claridge. 2002. Effect of heavy metal toxicities on vetiver growth. **Vetiver Grass**. Available Source: http://www.vetiver.org/AUS_toxaust15.hmt, February 2, 2002.
- Tulane University. 2005. **X-ray**. Available Source: <http://www.tulane.edu/sanelson/eens211/x-ray.htm>, March 31, 2005.
- Underwood, E.J. 1977. **Trace Element in Human and Animal Nutrition**. 4th ed., Academic Press, New York.
- United States Environmental Protection Agency (US. EPA.). 1993. **Process Design Manual-Land Application of Municipal Sludge, EPA-625/1-83-016**. Cincinnati, Ohio, USA.
- Walkley, A. and J.A. Black. 1934. An examination on the degtjaieff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Sci.** 37: 29-38.
- Welz, B. 1985. **Atomic Absorption Spectrometry**. Zehnersche Buchdruckerei, Germany.

- Whiston, C. 1987. **Analytical Chemistry by Open Learning X-ray Method**. John Wiley & Sons, Singapore.
- Williamson, C. and S. Andy. 1996. **Oxford X-ray Fluorescence**. Oxford Instruments Industrial Analysis Group, Oxford, England.
- Zheng, C., C. Tu and H.M. Chen. 1998. A preliminary study on purification of vetiver for eutrophic water, p. 81-84. *In* **Vetiver Research and Development**. China Agricultural Science and Technology Press, Beijing.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 พีเอชของดิน(Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973)

ระดับ (rating)	พิสัย (range)
กรดจัดมาก	<4.5
กรดจัด	4.5-5.0
กรดแก่	5.1-5.5
กรดปานกลาง	5.6-6.0
กรดเล็กน้อย	6.1-6.5
กลาง	6.6-7.3
ด่างอ่อน	7.4-7.8
ด่างปานกลาง	7.9-8.4
ด่างแก่	8.4-9.0
ด่างจัด	>9.0

ตารางผนวกที่ 2 อินทรียวัตถุในดิน (Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973)

ระดับ (rating)	พิสัย (range) (g/kg)
ต่ำมาก	<5
ต่ำ	5-10
ค่อนข้างต่ำ	10-15
ปานกลาง	15-25
ค่อนข้างสูง	25-35
สูง	35-45
สูงมาก	>45

ตารางผนวกที่ 3 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (Total N)

(Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973)

ระดับ (rating)	พิสัย (range) (g/kg)
ต่ำมาก	<0.25
ต่ำ	0.5-0.75
ปานกลาง	0.75-1.25
สูง	1.25-1.75
สูงมาก	>1.75

ตารางผนวกที่ 4 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P)

(Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973)

ระดับ (rating)	พิสัย (range) (mg/kg)
ต่ำมาก	<3
ต่ำ	3-6
ค่อนข้างต่ำ	6-10
ปานกลาง	10-15
ค่อนข้างสูง	15-25
สูง	25-45
สูงมาก	>45

ตารางผนวกที่ 5 ปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ (Extractable K)

(Land Classification Division and FAO Project Staff, 1973)

ระดับ (rating)	พิสัย (range) (mg/kg)
ต่ำมาก	<30
ต่ำ	30-60
ปานกลาง	60-90
สูง	90-120
สูงมาก	>120

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวสิริกร อนันต์เต่า
วัน เดือน ปี ที่เกิด	22 กันยายน พ.ศ. 2523
สถานที่เกิด	จังหวัดชัยภูมิ
ประวัติการศึกษา	กศ. บ. (วิทย์-ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (พ. ศ. 2546)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์ระดับปริญญา โท-เอก จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ. ศ. 2549)