



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตร์

สาขา

สายวิชา

เรื่อง การเปรียบเทียบการใช้ทานตะวันและข้าวฟ่างในการดูดซับตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินจาก
บ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี

Comparison of Sunflower and Sorghum in Absorbing Lead Contaminated Soil
from Klity Village, Kanchanaburi Province

نامผู้วิจัย นายสายชล สุขญาณกิจ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนวรรณ พาณิชพัฒน์, ปร.ด.)

หัวหน้าสายวิชา

(อาจารย์สหัสวุฒิ เพชรศรี, วท.ด.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ. _____

สืบสิงห์ มทววิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเปรียบเทียบการใช้ทานตะวันและข้าวฟ่างในการดูดซับตะกั่วที่ปนเปื้อน
ในดินจากบ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี

Comparison of Sunflower and Sorghum in Absorbing Lead Contaminated Soil
from Klity Village, Kanchanaburi Province

โดย

นายสายชล สุขญาณกิจ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรและเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นายสาขชล สุขญาณกิจ 2556: การเปรียบเทียบการใช้ทานตะวันและข้าวฟ่างในการดูดซับ
ตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินจากบ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
(วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
สายวิชาวิทยาศาสตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ธนวรรณ พาณิชพัฒน์, ปร.ค. 64 หน้า

งานวิจัยเรื่องการเปรียบเทียบการใช้ทานตะวันและข้าวฟ่างในการดูดซับตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน
จากบ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเจริญเติบโตของทานตะวันและข้าวฟ่างที่
ปลูกในดินปนเปื้อน และไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ศึกษาปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของ
ทานตะวันและข้าวฟ่าง และเปรียบเทียบความสามารถของทานตะวันและข้าวฟ่างในการเคลื่อนย้าย
ตะกั่วจากดินเข้าสู่พืชทั้งสองชนิด จากผลการทดลองพบว่าทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อน
และไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีการสะสมน้ำหนักรากแห้งที่ไม่แตกต่างกัน ($P>0.05$) ปริมาณความเข้มข้นตะกั่วใน
ส่วนต่าง ๆ ของทานตะวันและข้าวฟ่างพบว่า ทานตะวันและข้าวฟ่างมีการสะสมตะกั่วในรากสูงที่สุด
รองลงมาคือ ลำต้นและใบ เปลือก ดอก และเมล็ด ตามลำดับ โดยทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว
ที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วันมีการสะสมตะกั่วโดยรวมสูงสุด (150.9 ± 15.8 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) เมื่อ
เปรียบเทียบการสะสมตะกั่วระหว่างทานตะวันและข้าวฟ่างพบว่า ทานตะวันมีความสามารถในการ
สะสมตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ได้สูงกว่าข้าวฟ่าง ด้านปริมาณความเข้มข้นตะกั่วในเมล็ดทานตะวันและข้าว
ฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วพบว่ามีค่าความเข้มข้นของตะกั่วในเมล็ดพืชทั้งสองชนิดเกินค่ามาตรฐาน
เพื่อการบริโภคเป็นอาหาร แต่ไม่เกินค่ามาตรฐานสำหรับใช้เป็นอาหารสัตว์ ส่วนประสิทธิภาพในการ
เคลื่อนย้ายตะกั่วจากดินสู่พืชทั้งสองชนิดในดินปนเปื้อนตะกั่วพบว่า ทานตะวันที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน
มีค่า BCF สูงสุด และทานตะวันที่ระยะเก็บเกี่ยว 35 วัน มีค่า TF สูงที่สุด

Saychol Sukyankij 2013: Comparison of Sunflower and Sorghum in Absorbing Lead Contaminated Soil from Klity Village, Kanchanaburi Province. Master of Science (Environmental Science and Technology), Major Field: Environmental Science and Technology, Division of Science. Thesis Advisor: Assistant Professor Thanawan Panich-pat, Ph.D. 64 pages.

The research on the comparison of sunflower and sorghum in absorbing lead contaminated soil from Klity village, Kanchanaburi province aimed to study on growth of sunflower and sorghum grown on lead contaminated and uncontaminated soils, lead accumulation in different parts of sunflower and sorghum, and efficiency of sunflower and sorghum for translocation lead from soils both plants. The results showed that the biomass production sunflower and sorghum planted in lead contaminated and uncontaminated soils not significantly different ($P>0.05$). Sunflower and sorghum had the highest lead accumulation in root, followed by stem and leaves, pericarp, flower and seed. Sunflower planted in lead contaminated soil at 105 days harvest showed the highest total lead in whole plant ($150.9\pm15.8 \text{ mg kg}^{-1}$). Sunflower had more ability to accumulate lead in different parts than sorghum. The lead content in seeds of sunflower and sorghum grown on lead contaminated soil exceeded the standard for human consumption but did not exceed the standard as animal feed. Sunflower was more efficient than sorghum in translocating lead from soil into plant. Sunflower at day 105 of harvest had the highest BCF and sunflower at day 35 of harvest had the highest TF.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนวรรณ พานิชพัฒน์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำแนะนำเรื่องการเรียนรู้ การวางแผนงานวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตติยา แซ่ปึง ประธานการสอบปากเปล่าขั้นสุดท้าย และ ศาสตราจารย์ ดร. มาลียา เครือตราฐ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากศูนย์ส่งเสริมการวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยี (ศสวท.) คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์ ดร. ลักษณา กันทะมา นักวิจัยจากฝ่ายปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง สถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน นักวิจัยจากโครงการจัดตั้งสายวิชาเคมี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้คำปรึกษาทั้งในด้านเทคนิคการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งเทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ และสมาชิกในครอบครัวทุกคน ที่สนับสนุนทุนการศึกษาและคอยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมา

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบูรพาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้านต่าง ๆ ให้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

สายชล สุขญาณกิจ

มีนาคม 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	14
อุปกรณ์	14
วิธีการ	16
ผลและวิจารณ์	25
ผล	25
วิจารณ์	37
สรุปและข้อเสนอแนะ	47
สรุป	47
ข้อเสนอแนะ	48
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	49
ภาคผนวก	58
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	64

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณตะกั่วในดินของบ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี	13
2	ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วจากการสำรวจดินในพื้นที่บ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี	18
3	สมบัติทางเคมีและกายภาพของดินที่ใช้ทดลอง	22
4	ความเข้มข้นตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของทานตะวันและข้าวฟ่าง	34
5	ค่า Bioconcentration factor Translocation factor และ Uptake by plant ของทานตะวันและข้าวฟ่าง	36
ตารางผนวกที่		
1	ความสูงของทานตะวันและข้าวฟ่างในการปลูกครั้งที่หนึ่ง	59
2	ความสูงของทานตะวันและข้าวฟ่างในการปลูกครั้งที่สอง	59
3	น้ำหนักแห้งของทานตะวันและข้าวฟ่างในการปลูกครั้งที่หนึ่ง	59
4	น้ำหนักแห้งของทานตะวันและข้าวฟ่างในการปลูกครั้งที่สอง	59
5	ค่า Tolerance index ของทานตะวันและข้าวฟ่าง	60
6	ความเข้มข้นตะกั่วในทานตะวันและข้าวฟ่างซึ่งปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว (ครั้งที่หนึ่ง)	61
7	ความเข้มข้นตะกั่วในทานตะวันและข้าวฟ่างซึ่งปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว (ครั้งที่หนึ่ง)	61
8	ความเข้มข้นตะกั่วในทานตะวันและข้าวฟ่างซึ่งปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว (ครั้งที่สอง)	62
9	ความเข้มข้นตะกั่วในทานตะวันและข้าวฟ่างซึ่งปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว (ครั้งที่สอง)	62
10	ความเข้มข้นตะกั่วในดินก่อนปลูก หลังปลูกครั้งที่หนึ่ง และหลังปลูกครั้งที่สอง	63

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	จุดเก็บตัวอย่างในการสำรวจปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในดินบ้านคลิตี้ ตำบลชะแล อำเภอลองพญาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี	18
2	ความสูงของทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว	27
3	น้ำหนักแห้งของทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว	27
4	ค่า Tolerance Index ของทานตะวัน	28
5	ความสูงของข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว	29
6	น้ำหนักแห้งของข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว	29
7	ค่า Tolerance Index ของข้าวฟ่าง	30
8	ความเข้มข้นตะกั่วในรากทานตะวันและข้าวฟ่าง	31
9	ความเข้มข้นตะกั่วในลำต้นและใบทานตะวันและข้าวฟ่าง	32
10	ความเข้มข้นตะกั่วในดอก เปลือก และเมล็ดของทานตะวันและข้าวฟ่าง	33

การเปรียบเทียบการใช้ทานตะวันและข้าวฟ่างในการดูดซับตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน
จากบ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี

Comparison of Sunflower and Sorghum in Absorbing Lead Contaminated Soil
from Klity Village, Kanchanaburi Province

คำนำ

ปัจจุบันทั่วโลกกำลังประสบปัญหาวิกฤตการณ์จากภาวะมลพิษในสิ่งแวดล้อม เนื่องมาจากการปนเปื้อนและการสะสมสารเคมีและของเสียอันตราย การตกค้างและการปนเปื้อนของสารอันตรายในสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการผลิตและการใช้สารเคมีในปริมาณมาก ทั้งในภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม การบริโภค และการประกอบกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ รวมทั้งการเกิดภัยธรรมชาติ เช่น การเกิดแผ่นดินไหว อุทกภัย หรือวาตภัย ทำให้สารเคมีที่เป็นพิษรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม ทั้งสารเคมีที่เป็นผลิตภัณฑ์ทางอ้อมจากภาคอุตสาหกรรม ของเสียจากครัวเรือน น้ำทิ้งจากชุมชน การทำเหมืองแร่ เช่น ตะกั่วและดีบุก เป็นต้น (Yoon *et al.*, 2006) ตะกั่วมีประโยชน์อย่างมากในภาคอุตสาหกรรม เพราะเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตแบตเตอรี่ และใช้ในการบัดกรีชิ้นส่วนโลหะชนิดต่าง ๆ แต่ตะกั่วมีโทษเช่นกัน หากมีตะกั่วมีการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำ ดิน หรืออากาศจะมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในบริเวณนั้น กล่าวคือ หากมีการบริโภคน้ำหรือพืชจากแหล่งที่มีการปนเปื้อนก็จะเป็นสาเหตุให้ตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย ส่งผลต่อระบบทางเดินอาหาร และระบบประสาท (อติสา, 2553) โดยขึ้นอยู่กับปริมาณตะกั่วที่รับเข้าสู่ร่างกาย

วิธีการบำบัดสารมลพิษประเภทโลหะหนักมีหลากหลายวิธี การใช้พืชบำบัดเป็นวิธีที่นิยมกันมากวิธีหนึ่ง (Mudgal *et al.*, 2010) เนื่องจากเป็นวิธีบำบัดที่ง่ายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม พืชที่ใช้ในการบำบัดมีหลายชนิด อาจเป็นวัชพืช พืชไร่ หรือไม้ประดับชนิดต่าง ๆ แต่ทั้งนี้พืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการบำบัดสารมลพิษได้ต่างกัน ขึ้นอยู่กับกลไกและประสิทธิภาพของพืชชนิดนั้น ๆ โดยในการทดลองนี้ ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของทานตะวันและข้าวฟ่าง ในการดูดซับตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินที่บ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของตะกั่วสูง เนื่องจากในอดีตพื้นที่ดังกล่าวมีการทำเหมืองแร่ตะกั่วและมีการจัดการกับน้ำที่ปนเปื้อนไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการ ส่งผลให้เกิดการแพร่กระจายของตะกั่วทั้งในน้ำและในดิน

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว
2. เพื่อศึกษาความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของทานตะวันและข้าวฟ่าง
3. เพื่อเปรียบเทียบความสามารถของทานตะวันและข้าวฟ่างในการเคลื่อนย้ายตะกั่วมาสะสมในส่วนต่าง ๆ ของพืช

การตรวจเอกสาร

1. ตะกั่ว (Lead, Pb)

ตะกั่ว (Pb) เป็นธาตุอยู่ในหมู่ 4A คาบที่ 6 มีเลขอะตอม 82 เลขมวล 207.19 มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 2 และ 4 มนุษย์รู้จักใช้ตะกั่วมานานแล้ว โดยใช้สินแร่ตะกั่ว ได้แก่ กาลีนา (galena, PbS) และ เซร์ไรต์ (cerussite, PbCO₃) เนื่องจากตะกั่วมีสมบัติที่ง่ายต่อการใช้ เช่น มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 327 องศาเซลเซียส จึงง่ายต่อการหลอม โลหะชนิดนี้มีลักษณะอ่อนมาก ง่ายต่อการตัด ขึ้นรูป จึงถูกนำมาใช้ทำเป็นแผ่นหรือท่อ องค์การอนามัยโลกกำหนดปริมาณตะกั่วในน้ำดื่มไม่เกิน 100 ไมโครกรัม/กิโลกรัม (ศุภมาส, 2539)

1.1 ประโยชน์ของตะกั่ว

ตะกั่วในรูปอนินทรีย์ใช้ทำประโยชน์มาก เช่น ใช้ทำฉนวนหุ้มสายเคเบิล ฉนวนกันแก๊สมันตรังสี ใช้ในอุตสาหกรรมทำพลาสติกและแก้ว ใช้ทำเม็ดสี ตะกั่วเตตราเอทิล และ เทตราเมทิล ใช้ผสมน้ำมัน ซึ่งตะกั่วเหล่านี้ เป็นสารที่ถูกที่สุดในการเพิ่มค่า ออกเทน (octant) ในน้ำมัน และเมื่อถูกเผาไหม้ตะกั่วจะปลดปล่อยออกมากับท่อไอเสีย

1.2 ปฏิกิริยาในดิน

สินแร่ตะกั่วในธรรมชาติ เช่น กาลีนา เมื่อสลายตัวจะถูกออกซิไดซ์อย่างช้าๆ ในรูปคาร์บอเนตหรือถูกตรึงโดยดินเหนียว ออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม รวมทั้งอินทรีย์วัตถุ โดยทั่วไปตะกั่วอยู่ในรูป Pb²⁺ มากกว่า Pb⁴⁺ องค์ประกอบของตะกั่วที่มีความเกี่ยวข้องกับชั้นหินแข็งได้ดิน และมีการเคลื่อนย้ายน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะหนักชนิดอื่นๆ อีกทั้งมีความเข้มข้นต่ำเมื่ออยู่ในสารละลายดิน และส่วนใหญ่มีความเกี่ยวข้องกับแร่ดินเหนียว เหล็กออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ และอลูมิเนียมออกไซด์ รวมถึงอินทรีย์วัตถุด้วย (Kabata-Pendias and Pendias, 1992) และมีลักษณะคล้ายกลุ่มโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earth) ดังนั้น จึงสามารถเข้าแทนที่ K, Ba, Sr หรือแม้แต่ Ca ในแร่ และในตำแหน่งที่ไอออนของธาตุเหล่านี้ถูกดูดซับ (ศุภมาส, 2539)

Sinegani and Khalilikhah (2008) รายงานว่า ธาตุโลหะหนักมีสภาพการเคลื่อนที่ได้น้อย และสภาพการละลายจะลดลงอย่างมากเมื่อมีการใส่ปูน ในดิน pH สูง โลหะหนักบางชนิดรวมถึงตะกั่วจะตกตะกอนในรูปออกไซด์ฟอสเฟตหรือคาร์บอเนต หรือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์และมีความเสถียรค่อนข้างมาก การเพิ่มความเป็นกรดแก่ดินจะทำให้สภาพการละลายได้ของตะกั่วเพิ่มขึ้นได้

บ้าง นอกจากนั้นปริมาณตะกั่วในดินบนจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรีย์วัตถุ โดยถ้าในดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง จะมีผลทำให้ตะกั่วในดินมีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ลดลง (Changcun *et al.*, 2008)

1.3 ปฏิกริยาในดินและพืช

ตะกั่วในดินบนมีปริมาณตั้งแต่ 1.5-189 มิลลิกรัม/กิโลกรัม โดยค่าเฉลี่ยสูงสุดไม่ควรเกิน 70 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในดินอันดับ Histosols มีค่าเฉลี่ยสูงถึง 44 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และค่าเฉลี่ยของดินชนิดต่าง ๆ อยู่ที่ประมาณ 22-29 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ดังนั้นโดยทั่วไปตะกั่วในดินบนควรมีค่าเฉลี่ย 25 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนตะกั่วในดินที่มีปริมาณการปนเปื้อนมาก ๆ เช่น ดินในเหมืองแร่เก่าอาจมีค่าตั้งแต่ 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ขึ้นไป ปริมาณตะกั่วในพืชปกติมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-3.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (สุกมาศ, 2539) สำหรับปริมาณตะกั่วที่เป็นพิษต่อพืชนั้นประเมินค่าได้ค่อนข้างยาก แต่อาจสรุปได้ว่าความเข้มข้นของตะกั่วในพืชควรมีค่าอยู่ระหว่าง 100-500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Kabata-Pendias and Pendias, 1992) พืชหลายชนิดมีศักยภาพในการดูดซับโลหะหนักได้เป็นอย่างดีโดย Marchiol *et al.* (2004) รายงานว่า ห้วไชเท้ามีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้มากกว่าต้นคาโนลา และจากการศึกษาของ Marchiol *et al.* (2007) พบว่า ทานตะวันและข้าวฟ่างสามารถเจริญเติบโตได้เป็นอย่างดีในดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักหลายชนิด โดยพืชทั้งสองชนิดมีการสะสมโลหะหนักในเนื้อเยื่อรากมากกว่าเนื้อเยื่อในส่วนอื่น ๆ ในขณะที่ Mudgal *et al.* (2010) รายงานว่า ทานตะวันมีการสะสมตะกั่วในใบและลำต้น จึงมีความสามารถปรับปรุงดินในเขตเหมืองร้างและเขตอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนของตะกั่วสูง เช่นเดียวกับข้าวฟ่างที่มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้เป็นอย่างดี (Zhuang *et al.*, 2009)

1.4 การแพร่กระจายของตะกั่วในสภาพแวดล้อม

ตะกั่วเป็นธาตุที่มีการนำมาใช้มากจึงทำให้มีการปนเปื้อนอยู่ในสภาพแวดล้อม ทั้งในน้ำ ดิน และอากาศ อีกทั้งมีการสะสมในสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีการนำตะกั่วไปผสมในน้ำมัน จึงทำให้มีตะกั่วปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามตะกั่วสามารถมาจากแหล่งอื่นได้ คือ อาจมาจากการถลุงแร่ตะกั่วหรือโรงงานถลุงแร่อื่น ๆ ซึ่งล้วนมีตะกั่วปนเปื้อนออกมา และที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือการใช้ปุ๋ยและยากำจัดศัตรูพืชที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ ทำให้พื้นที่เหล่านั้นมีการสะสมของตะกั่วในปริมาณสูงกว่าระดับปกติ ทั้งในน้ำ ดิน และดินตะกอน ซึ่งกิจกรรมต่าง ๆ ดังกล่าวทำให้มีตะกั่วเจือปนเข้าสู่ระบบนิเวศ (สุกมาศ, 2539)

1.5 การปนเปื้อนของตะกั่ว

การปนเปื้อนต่อสภาพแวดล้อมของตะกั่ว เกิดได้จากทั้งที่เป็นการปนเปื้อนจากสถาน-การณ์ธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิด และจากการกระทำของมนุษย์ เช่น จากการถลุงแร่ จากควัน และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (Kabata-Pendias and Pendias, 1992; ศุภมาส, 2539)

Yoon *et al.* (2006) รายงานว่า การปนเปื้อนของตะกั่วในดินเกิดจากการใช้ดินเป็นแหล่งทิ้งกากตะกอนน้ำโสโครก (sewage sludge) และอินทรีย์วัตถุเหลือใช้ (organic waste) ต่าง ๆ เช่น มูลสัตว์ สารประกอบทางเคมี ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง และวัสดุเหลือใช้จากครัวเรือน (domestic waste) เช่น การถลุงสินแร่ กาลีนา ทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ในวงกว้าง เนื่องจากสินแร่ต่าง ๆ อาจเกิดการแทนที่ของธาตุโลหะที่มีขนาดเท่า ๆ กัน โดยกระบวนการแทนที่สัณฐานใกล้เคียง (isomorphous substitution) ทำให้มีการปนเปื้อนของธาตุโลหะอื่นขึ้นได้ในสินแร่เหล่านั้น ๆ เช่น สามารถเกิดได้กับสินแร่ในรูปซัลไฟด์ โดยอาจเกิดได้กับทั้งโลหะเอง และกับซัลเฟอร์แอนไอออน (ศุภมาส, 2539)

โดยปกติตะกั่วที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ระยะแรกมักอยู่ในสภาพตะกั่วไดฟอสเฟต (lead diphosphate) ซึ่งสามารถแพร่กระจายไปตามเนื้อเยื่ออ่อน เช่น สมอง ปอด ตับ ม้าม และไต เป็นต้น ประมาณ 30% หลังจากนั้นจะเข้าสู่สมที่กระดูกในรูปตะกั่วไตรฟอสเฟต (lead triphosphate) อีกประมาณ 70% ซึ่งการสะสมนี้จะมีผลต่อเซลล์ในเนื้อเยื่อต่าง ๆ โดยจะทำให้เกิดการผิดปกติโดยเฉพาะในเนื้อเยื่ออ่อนที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว อาการแบบเฉียบพลันของการได้รับตะกั่ว คือ คลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้องรุนแรง ชัก หมดสติ อาจมีอาการเยื่อหุ้มสมองอักเสบเฉียบพลัน รวมทั้งมีอาการทางระบบประสาท (อลิสสา, 2553)

ตะกั่วเข้าสู่พืชได้สองทางคือ ทางรากและทางใบ เมื่อเข้าสู่พืชแล้วจะสะสมอยู่ในเยื่อหุ้มเซลล์ ไมโทคอนเดรีย และไซโทพลาซึม ตะกั่วสะสมอยู่ในรากฝอยและรากขนาดเล็ก พืชของตะกั่วในพืชเกิดขึ้นโดยการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงของพลาสมิด (plasmid) ยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์ซักซิเนต (succinate) ในกระบวนการหายใจที่ไมโทคอนเดรีย มีผลต่อการสังเคราะห์แสง ยับยั้งการเจริญของรากและใบ และยืดเวลาการงอกของเมล็ด ตะกั่วในดินแทบทั้งหมดอยู่ในรูปที่พืชดูดมาใช้ไม่ได้ มีเพียง 0.003-0.005 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เท่านั้นที่พืชสามารถดูดมาใช้ได้ (ศุภมาส, 2539) การย้ายตำแหน่งของตะกั่วจากรากไปยังส่วนบนของต้นพืชเกิดขึ้นได้น้อยมาก เนื่องจากตะกั่วละลายน้ำได้น้อยมาก โอกาสที่พืชจะดูดมาใช้จึงมีน้อย และส่วนใหญ่จะมีการสะสมอยู่บริเวณรากเสียเป็นส่วนใหญ่ (Yoon *et al.*, 2006)

จากการศึกษาของ Zhuang *et al.* (2009) พบว่า ข้าวฟ่างมีศักยภาพในการกำจัดตะกั่วที่มีการปนเปื้อนในพื้นที่ทำการเกษตรได้ถึง 0.35 กิโลกรัม/เฮกเตอร์ และหากมีการใช้ EDTA ร่วมด้วยจะสามารถเพิ่มศักยภาพในการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนได้ประมาณ 0.46-0.64 กิโลกรัม/เฮกเตอร์ ในขณะที่ Marchiol *et al.* (2007) ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะของทานตะวันและข้าวฟ่าง พบว่า ข้าวฟ่างมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะสูงกว่าทานตะวันประมาณ 10 เท่า และภาวะมลพิษของตะกั่วมีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน โดยจำกัดการทำงานของระบบเอนไซม์ ทำให้การสลายของอินทรีย์วัตถุเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอินทรียสารที่สลายตัวได้ยาก นอกจากนั้นอาจมีผลทำให้ไนโตรเจนในดินสะสมในรูปไนเตรท ซึ่งส่วนใหญ่เกิดในดินที่มี CEC ต่ำ (ศุภมาส, 2539)

2. กระบวนการ Phytoextraction

กระบวนการ phytoextraction คือ กระบวนการกำจัดสารมลพิษ ได้แก่ สารประกอบเคมีอินทรีย์ โลหะหนัก และธาตุกัมมันต์ เช่น ยูเรเนียม ซีเซียม และเทลลูเรียม เป็นต้น จากดินและ/หรือน้ำโดยการดูดซึม การลำเลียง หรือการเคลื่อนย้ายสารมลพิษเหล่านั้นเข้าสู่พืชทางราก และการสะสมอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ราก ใบ และลำต้น สำหรับในกรณีนี้ พืชจะสะสมสารมลพิษเหล่านี้โดยไม่มีการย่อยสลายต่อไป ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นจากการที่พืชนั้นขาดกลไกหรือวิธีการย่อยสลาย (degradation mechanism หรือ pathway) ที่เหมาะสมต่อสารมลพิษเหล่านี้ จากนั้นพืชที่มีการสะสมสารมลพิษในส่วนต่าง ๆ เหล่านี้จะต้องถูกนำไปบำบัดด้วยวิธีการต่าง ๆ ต่อไป เช่น การนำไปเผา การฝังกลบ และการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ เป็นต้น นอกเหนือจากการบำบัดแล้วในกรณีของโลหะหนักที่สะสมอยู่ในพืชอาจนำไปผ่านกระบวนการสกัด (recover) โลหะหนัก เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ พืชที่นำมาใช้ในการบำบัดสารมลพิษ และโลหะหนักด้วยวิธีนี้ต้องเป็นพืชที่มีความทนทานต่อความเป็นพิษของสารมลพิษนั้น ๆ มีการเจริญเติบโตรวดเร็ว และเป็นพืชที่มีรากแขนงแผ่ออกไปได้กว้างเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการดูดซึมสารมลพิษ นอกจากนั้นควรมีการสะสมสารมลพิษในส่วน of พืชที่มีการตัดแยกออกได้ง่ายโดยไม่ต้องมีการตัดทิ้งทั้งต้น เช่น สะสมที่ใบ หัว และบางส่วนของราก เป็นต้น นอกจากสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ ปัจจัยหลักสองปัจจัยที่นำมาใช้ในการประเมิน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการ phytoextraction ของพืชชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ผลผลิตมวลชีวภาพ (biomass production) และค่า bioconcentration factor (อลิสฯ, 2553)

ปริมาณการผลิตมวลชีวภาพ หรืออีกนัยหนึ่งคือ การเจริญเติบโตของพืช เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกระบวนการ phytoextraction เนื่องจากการเลือกใช้พืชที่มีอัตราการเจริญเติบโตสูง จะทำให้พืชสามารถดูดซึมสารมลพิษต่าง ๆ ได้มากขึ้น ส่วนค่า bioconcentration factor คืออัตราส่วนของความเข้มข้นของสารมลพิษที่สะสมอยู่ในส่วนของพืชต่อความเข้มข้นของสารมลพิษในสิ่งแวดล้อมนั้น ค่านี้แสดงถึงความสามารถของพืชในการดูดซึมและลำเลียงสารมลพิษไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืช พืชโดยทั่วไปตามธรรมชาติมีค่า bioconcentration factor น้อยกว่า 1 ซึ่งหมายความว่า ค่าความเข้มข้นของสารมลพิษที่

สามารถสะสมอยู่ในพืชมีค่าน้อยกว่าค่าความเข้มข้นของสารมลพิษในสิ่งแวดล้อมรอบข้าง ซึ่งพืชที่มีค่า bioconcentration factor น้อยกว่า 1 ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในระบบการบำบัดสารมลพิษ ตามหลักการนี้ พืชธรรมชาติทั่วไปจะดูดซึมสารพิษเข้ามาในตัวในปริมาณที่น้อย และเป็นปริมาณที่น้อยกว่าปริมาณที่คงเหลือปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมรอบข้าง ดังนั้น ค่า bioconcentration factor ซึ่งเป็นอัตราส่วนจึงคำนวณออกมามีค่าน้อยกว่า 1 อย่างไรก็ตามมีพืชบางประเภทที่มีความสามารถในการดูดซึมสารมลพิษ และสามารถสะสมสารเหล่านี้ในตัวเองได้ในปริมาณมาก พืชเหล่านี้มีค่า bioconcentration factor ที่สูง สำหรับพืชที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับกระบวนการ phytoextraction ควรจะมีค่า bioconcentration factor เท่ากับหรือมากกว่า 20 (อลิสตา, 2553)

เนื่องจากการเลือกใช้พืชที่มีค่า bioconcentration factor สูงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการนำพืชมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดสารมลพิษ และโลหะหนักที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีการศึกษาค้นคว้าหาพืชที่มีความสามารถดังกล่าว พืชที่มีสมบัติการดูดซึมและสะสมสารมลพิษหรือโลหะหนักในระดับความเข้มข้นสูงนี้ เรียกว่า hyperaccumulator และเรียกกระบวนการสะสมสารมลพิษหรือโลหะหนักนี้ว่า hyperaccumulation ซึ่งระดับการสะสมสารมลพิษหรือโลหะหนักในพืชอยู่ในช่วง 0.1-1 % โดยน้ำหนักแห้งของพืช พืชที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มนี้สามารถสะสมโลหะหนักได้มากกว่าพืชทั่วไป 50-100 เท่า ในปัจจุบันพบพืชที่มีสมบัติดังกล่าวประมาณ 400 ชนิด ตัวอย่างของพืชกลุ่มนี้ เช่น alpine penny-cress (*Thlaspi caerulescens*) และ sand rock-cress (*Cardaminopsis halleri*) ซึ่งสามารถสะสมสังกะสีและแคดเมียมในปริมาณสูง และเฟิร์นกูดหมาก (*Pteris vittata*) สามารถสะสมสารหนูได้ในปริมาณสูง จากการศึกษาของ Tanhan *et al.* (2007) พบว่า siam weed (*Chromolaena odorata* (L.) King & Robinson) มีการสะสมตะกั่วในส่วนรากและส่วนเหนือดินสูงถึง 4,236 และ 1,377 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ และมีความทนทานต่อความเข้มข้นของตะกั่วในดินสูงถึง 100,000 มิลลิกรัม/กิโลกรัม อย่างไรก็ตาม พบว่าพืชในกลุ่ม hyperaccumulator เหล่านี้ ส่วนใหญ่มีมวลชีวภาพต่ำ เช่น alpine penny-cress มีมวลชีวภาพเพียง 2-5 ต้นต่อเฮกตาร์ (อลิสตา, 2553)

2.1 กลไกการสะสมสารมลพิษ โลหะหนัก หรือสารกัมมันตรังสีในพืช

Macek *et al.* (2004) พบว่า กลไกการสะสมสารมลพิษ โลหะหนักหรือสารกัมมันตรังสีในพืชสามารถแบ่งได้ 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การดูดซึม (adsorption) การลำเลียง และการเคลื่อนย้ายสารมลพิษจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่พืช ซึ่งท้ายสุดแล้วสารมลพิษเหล่านั้นจะถูกกักเก็บ (store) แยกไว้ในส่วนใดส่วนหนึ่งของเซลล์พืช (sequestration) และอยู่ในรูปแบบที่ไม่เป็นพิษต่อเซลล์พืช สำหรับกลไกที่เป็นที่รู้จักกันดี ได้แก่ กลไกการสร้างสารประกอบของโลหะหนักกับเปปไทด์ที่มีกรดอะมิโนซิสเทอีนจำนวนมาก (cysteine rich peptides) การสร้างสารประกอบระหว่างโลหะกับเมทาไธโอนีน (metallothionines) และกลไกการคีเลต (phytochelation)

กลไกการสร้างสารประกอบระหว่างโลหะหนักกับเปปไทด์ที่มีกรดอะมิโนซิสเทอีนจำนวนมาก เกิดขึ้นจากการสร้างพันธะที่ตำแหน่งของซัลเฟอร์ของกรดอะมิโนซิสเทอีน (R-SH) กับโลหะหนัก เช่น Ag , AsO_3^{3-} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Hg^{2+} และ Ni^{2+} เป็นต้น

สำหรับการสร้างสารประกอบระหว่างโลหะหนักกับเมทไธโอนีนนั้น พบว่า เป็นกลไกที่เกิดขึ้นได้ดีกับโลหะที่มีประจุเป็นบวก เช่น ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) เป็นต้น กลไกการสร้างสารประกอบระหว่างโลหะกับเมทไธโอนีนนี้ ทำให้พืชสะสมโลหะหนักได้ในปริมาณสูง และช่วยให้พืชสามารถต้านทานความเป็นพิษของโลหะหนักที่มีความเข้มข้นสูงได้ นอกจากนี้พบว่า การสร้างสารประกอบโลหะหนักกับเมทไธโอนีนนี้มีความเกี่ยวข้องกับวิธีการสร้างสารประกอบกลูตาไธโอน (glutathions) ซึ่งเป็นกลไกการลำเลียงสารประกอบเหล่านั้นเพื่อกักเก็บไว้ในแวคิวโอลของพืช

กลไกการคีเลต (phytochelation) เกิดจากการสร้างสารประกอบระหว่างโลหะหนักและ phytochelatin (PC) ซึ่งเป็นเปปไทด์ สารประกอบที่เกิดขึ้นนี้ พืชจะเก็บไว้ในแวคิวโอล เช่น การสร้างสารประกอบระหว่าง phytochelatin และแคดเมียมซึ่งช่วยในการลำเลียงแคดเมียมไปสู่แวคิวโอลของพืช เพื่อลดความเป็นพิษ (Macek *et al.*, 2004; อลิสา, 2553) การจับกันระหว่าง phytochelation และแคดเมียมนี้ ส่งผลให้พืชสามารถต้านทานความเข้มข้นของแคดเมียมได้สูงขึ้น และช่วยในการลำเลียงสารประกอบเหล่านั้นเข้าสู่แวคิวโอลของพืช

2.2 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการ phytoextraction ในการบำบัดมลพิษจากสิ่งแวดล้อม

phytoextraction เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการนำมาบำบัดสารมลพิษชนิดต่าง ๆ จากสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบแต่ละกระบวนการในการบำบัดสารมลพิษ แต่ละกระบวนการจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน สำหรับข้อดีของกระบวนการ phytoextraction สรุปได้ดังนี้

ข้อดีของกระบวนการ phytoextraction

1. มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้นต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ
2. เป็นวิธีที่ง่ายในการประยุกต์ใช้ กระบวนการบำบัดสามารถทำได้ง่ายและไม่ซับซ้อน
3. เป็นวิธีที่ไม่ทำลายหน้าดินของบริเวณที่บำบัด
4. เป็นวิธีที่เป็นที่ยอมรับได้ของสังคม เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดมลภาวะอื่น ๆ ตามมา

ข้อดีของกระบวนการ phytoextraction

1. ใช้เวลาในการบำบัดนานกว่าการบำบัดโดยใช้จุลินทรีย์ เนื่องจากพืชใช้เวลาในการเจริญเติบโต
2. ควบคุมการบำบัดสารมลพิษได้ยาก เนื่องจากการเจริญเติบโตของพืชมีความแตกต่างกันตามฤดูกาล
3. ความเป็นพิษของสารพิษอาจทำให้การเจริญเติบโตของพืชช้าลง หรือทำให้พืชตายได้
4. ต้องเลือกใช้พืชที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อพื้นที่ที่จะบำบัด เนื่องจากพืชแต่ละชนิดมีลักษณะสมบัติที่ต่างกัน เช่น ความสามารถในการทนทานต่อสภาพแวดล้อม ความสามารถในการทนต่อความเป็นพิษของสารมลพิษต่าง ๆ ความสามารถในการดูดซึมและสะสมสารมลพิษ เป็นต้น
5. พืชที่ใช้ในการบำบัดสารมลพิษเหล่านี้จะมีการสะสมสารมลพิษ ดังนั้น จึงจัดเป็นพืชที่เป็นอันตรายต่อสัตว์ และเป็นอันตรายต่อห่วงโซ่อาหาร
6. การใช้พืชในกระบวนการกำจัดสารมลพิษอาจไม่เหมาะสมในบางสถานะและในบางพื้นที่ เช่น พื้นที่ที่มีความแห้งแล้งสูง พื้นที่ที่ขาดธาตุอาหารที่จำเป็นกับพืช หรือพื้นที่ที่มีความเป็นกรด ด่าง หรือความเค็มของเกลือสูง เป็นต้น

3. ทานตะวัน (sunflower)

ทานตะวันเป็นพืชน้ำมันที่มีความสำคัญชนิดหนึ่ง มีถิ่นกำเนิดในเขตตะวันตกของสหรัฐอเมริกา และในศตวรรษที่ 18 ถูกนำไปปลูกที่รัสเซียเพื่อสกัดเป็นน้ำมัน น้ำมันจากทานตะวันจัดอยู่ในประเภทที่มีคุณภาพสูง ประกอบด้วยกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว คือ กรด linoleic, กรด linolenic และ กรด arachidonic นอกจากนี้ ในน้ำมันยังประกอบด้วยวิตามินเอ ดี อี และ เค ปริมาณวิตามินอีในน้ำมันทานตะวันสูงกว่าน้ำมันจากพืชชนิดอื่น เนื่องจากมี α -tocopherol หรือวิตามินอี ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระทำให้มีปริมาณออกซิเจนในน้ำมันน้อย จึงช่วยให้ไม่เกิดกลิ่นหืนเมื่อเก็บไว้นาน ปัจจุบันการผลิตทานตะวันยังไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ภายในประเทศ แม้ว่าจะใช้เฉพาะอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันเท่านั้น (ชูศักดิ์, 2542)

3.1 พฤกษศาสตร์ทั่วไป

ทานตะวันมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Helianthus annuus* L. อยู่ในวงศ์ Asteraceae

ราก รากทานตะวันมีการงอกแบบ epigeal germination มีระบบรากแบบรากแก้ว (tap root system) รากแก้วสามารถหยั่งลึกได้ถึง 150-270 เซนติเมตร ส่วนรากแขนงจะเจริญได้ดีในระดับผิวดินลึก 10-30 เซนติเมตร และแผ่ไปตามแนวนอนกว้าง 60-150 เซนติเมตร

ลำต้น ลำต้นตรง เป็นไม้เนื้ออ่อนมีขนขึ้นปกคลุมโดยทั่วไป มีความสูงระหว่าง 0.5-5.0 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-10 เซนติเมตร พันธุ์ที่ปลูกเพื่อการค้าความสูงอยู่ระหว่าง 1.5-2.5 เมตร

ใบ เมื่อทานตะวันออกโผล่พื้นดินจะเห็นใบเลี้ยงมีลักษณะกลมยาว เมื่อใบเลี้ยงโตเต็มที่จะขยายแผ่กว้างออก โดยทั่วไปใบมีขนาด 10-15 เซนติเมตร มีขนหยาบปกคลุมทั่วไป จำนวน 8-70 ใบต่อต้น ขึ้นกับพันธุ์และสภาพแวดล้อม

ดอก ช่อดอกเป็นแบบ head มีรูปร่างแบบ concave ช่อดอกของทานตะวันที่ใช้สกัดน้ำมัน มี ray flower และ disk flower โดย ray flower เกิดเรียงบริเวณขอบนอกของช่อดอก มีกลีบเชื่อมกันเป็นแผ่นเดียวมีขนาดใหญ่และยาว มีหลายสี เช่น เหลืองทอง เหลืองส้ม เป็นต้น

ผลและเมล็ด ผลเป็นแบบ achene แต่ละผลมี 1 เมล็ด ซึ่งประกอบด้วยเปลือกเมล็ด เอ็นโดสเปิร์ม และคัพพะ ผลมีสีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ เช่น ดำ ดำแถบเทา ดำแถบขาว และขาว เป็นต้น

พันธุ์ ในเมืองไทย พบว่า มีสายพันธุ์ที่ปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี เช่น Hysum 33 และ S 101 นอกจากนี้ยังมีพันธุ์ลูกผสมอื่น ๆ อีก เช่น พันธุ์แปซิฟิก (33, 150, 200) พันธุ์โอเปร่า และ พันธุ์เมโลดี้ เป็นต้น (ชูศักดิ์, 2542)

3.2 สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม

โดยทั่วไปทานตะวันสามารถเจริญเติบโตได้ในดินได้เกือบทุกชนิด สภาพที่เหมาะสมที่สุดคือ ช่วง pH ประมาณ 5.7-8.0 ดินเป็นดินร่วนปนทราย ซึ่งเป็นดินที่สามารถระบายน้ำได้ดี ถ้าดินมีความชื้นต่ำ จะทำให้ต้นเริ่มเหี่ยวในระยะเริ่มงอกและระยะสร้างดอก ปกติจะปลูกในขณะที่ดินยังมีความชุ่มชื้นเพียงพอสำหรับการเตรียมดินและการงอก (ชูศักดิ์, 2542)

3.3 การเก็บเกี่ยว

อายุเก็บเกี่ยวของทานตะวันคือ 90-100 วัน เมื่อเมล็ดทานตะวันสุกแก่ทางสรีรวิทยา ด้านหลังของจานดอกจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลือง โดยทั่วไปจะเก็บเกี่ยวเมื่อจานดอกเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ซึ่งเมล็ดจะมีความชื้น 12-14 % นำมาผึ่งแดด 2-3 วัน ก่อนนำไปกะเทาะเมล็ด (ชูศักดิ์, 2542)

3.4 การใช้ประโยชน์

เมล็ด ใช้บริโภคโดยตรง เป็นแหล่งของโปรตีนแทนเนื้อสัตว์ ในเมล็ดมีธาตุเหล็กสูง เมื่อนำมาบดจะได้แป้งสีขาว มีไขมันสูง มีโปรตีนมากกว่า 50% ของปริมาณแป้ง

เปลือกของลำต้น มีลักษณะเหมือนเนื้อไม้ นำมาทำกระดาษสีขาวคุณภาพดี

น้ำมัน น้ำมันที่สกัดได้จากเมล็ดมีปริมาณสูงถึง 35% และเป็นน้ำมันคุณภาพสูงประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว เช่น กรด linoleic และ กรด linolenic สูงถึง 60-70% และยังประกอบไปด้วยวิตามิน เอ ดี อี และ เค ซึ่งคุณภาพของวิตามินนี้จะสูงกว่าวิตามินชนิดอื่น

กาก กากที่เหลือจากการสกัดน้ำมัน นำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ซึ่งในกากทานตะวันที่จะเพาะเปลือก และบีบน้ำมันออกแล้วจะมีโปรตีน 42% ใช้เป็นแหล่งแคลเซียมสำหรับปศุสัตว์ได้เป็นอย่างดี (ชูศักดิ์, 2542)

4. ข้าวฟ่าง (sorghum)

ข้าวฟ่างเป็นธัญพืชที่มีลักษณะเด่น คือ มีความสามารถในการทนแล้ง นิยมปลูกในท้องที่ที่มีปริมาณน้ำฝนจำกัด ข้าวฟ่างมีถิ่นกำเนิดในแถบแอฟริกาตะวันออก แต่ปัจจุบันแหล่งผลิตที่สำคัญ ได้แก่ สหรัฐอเมริกา อินเดีย จีน ไนจีเรีย เม็กซิโก และซูดาน นับเป็นธัญพืชที่มีความสำคัญรองจากข้าวสาลี ข้าว และข้าวโพด เป็นพืชอาหารของทั้งมนุษย์และสัตว์ สำหรับประเทศไทยนิยมปลูกในเขตภาคกลางและภาคเหนือ สามารถขึ้นได้ในดินหลายชนิด ทนต่อสภาพแวดล้อมที่แปรปรวน โดยเฉพาะสามารถทนแล้งได้ดี (วัชร, 2542)

4.1 พฤกษศาสตร์ทั่วไป

ข้าวฟ่างมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Sorghum bicolor* (L.) Moench อยู่ในวงศ์ Poaceae

ราก ข้าวฟ่างมีระบบรากแบบรากฝอย (fibrous root system)

ลำต้น ข้าวฟ่างเป็นพืชที่มีลักษณะคล้ายข้าวโพดมาก ในขณะที่ยังเล็กลำต้นจะมีสีม่วงหรือสีม่วงอ่อน เมื่อสูง 10-15 เซนติเมตร จะมีการแตกกอจากตาที่ข้อล่าง เมื่อข้าวฟ่างโตเต็มที่ ลำต้นมีความสูงไม่น้อยกว่า 1 เมตร แต่จะสูงไม่เกิน 6 เมตร

ใบ ใบข้าวฟ่างมีลักษณะเรียวยาว ประกอบด้วยก้านใบและแผ่นใบ โดยส่วนของก้านใบจะห่อหุ้มอยู่รอบลำต้น ส่วนแผ่นใบมีสีเขียวเข้มกว่า มีเส้นใบตรงกลางเรียกว่า midrib และมีเส้นใบขนานไปกับเส้นกลางใบ ผิวหน้าเป็นมัน รอยต่อของใบเรียก leaf collar ซึ่งมองเห็นได้ชัดเจนจากใต้ใบ

ดอก ช่อดอกของข้าวฟ่างมีชื่อเรียกทั่วไปว่า head เป็นแบบ panicle เจริญมาจากปล้องสุดท้ายของลำต้นหรืออาจเรียกว่าก้านช่อดอก แกนกลางช่อดอกเรียก rachis จาก rachis มีกิ่งแขนงชุดแรกแตกออกมา และมีกิ่งชุดที่สองแตกออกจากกิ่งชุดแรก ดอกของข้าวฟ่างออกเป็นกลุ่ม เรียกกลุ่มของช่อดอกเหล่านี้ว่า spikelet ประกอบด้วยกลุ่มดอกย่อยที่ไม่มีก้าน (sessile spikelet) และกลุ่มดอกย่อยที่มีก้าน (pedicelled spikelet)

ผลและเมล็ด ข้าวฟ่างเป็นพืชผสมตัวเอง เมล็ดข้าวฟ่างจะเจริญเติบโตได้ดีทั้งที่ยังไม่มีกลีบ เมล็ดข้าวฟ่างอาจมีสีขาว เหลือง แดง ส้ม หรือน้ำตาล ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายในเมล็ด เช่น เมล็ด

ข้าวฟ่างที่มีสีน้ำตาลเข้มเนื่องจากมีสารแทนนิน (tannin) ส่วนเมล็ดที่มีสีเหลืองนั้นมีสาร carotene ซึ่งเป็นสารที่มีคุณค่าทางอาหารมาก (วัชร, 2542)

4.2 สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม

ข้าวฟ่างสามารถปลูกในดินได้แทบทุกชนิด โดยดินที่เหมาะสมที่สุดเป็นดินร่วนปนเหนียว (clay loam) หน้าที่ดินระบายน้ำดี pH ที่เหมาะสมคือ 5.5-8.7 โดยปกติ ข้าวฟ่างเจริญเติบโตได้ดีในที่ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 20 องศาเซลเซียส ยาวนานกว่า 4 เดือนและมีปริมาณน้ำฝนตลอดช่วงฤดูปลูกไม่น้อยกว่า 400 มิลลิเมตร (วัชร, 2542)

4.3 การเก็บเกี่ยว

เมล็ดข้าวฟ่างที่สุกแก่ทางสรีรวิทยาจะมีการงอก ความแข็งแรง และมีน้ำหนักแห้งสูง แต่ยังมี ความชื้นสูงประมาณ 20% จึงควรเก็บหลังระยะนี้ประมาณ 1 สัปดาห์ โดยทั่วไปเมล็ดข้าวฟ่างจะสุกแก่ หลังจากดอกบานประมาณ 45 วัน เมล็ดที่พร้อมจะเก็บเกี่ยวจะมีเนื้อเยื่อใต้เปลือกเมล็ดที่เรียกว่า black layer ถ้าเนื้อเยื่อนี้มีสีดำแสดงว่าเมล็ดพร้อมจะเก็บเกี่ยว (วัชร, 2542)

4.4 การใช้ประโยชน์

ใช้เป็นอาหารมนุษย์ เช่น ทำเป็นเส้นก๋วยเตี๋ยว เส้นหมี่ ขนมหุ้น และใช้เป็นอาหารสัตว์ เมล็ด และลำต้นของข้าวฟ่างสามารถใช้เป็นอาหารแก่สัตว์เลี้ยงหลายชนิด

ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ การผลิตแป้ง น้ำมันบริโภคนำมาผลิตกัณฑ์ขนมอบต่างๆ

ใช้ผลิตแอลกอฮอล์ น้ำส้มสายชู กรดแลคติก วิตามิน B12 ยาปฏิชีวนะ ทำมอลท์เพื่อใช้ทำ เบียร์ และทำน้ำเชื่อมกลูโคส ข้าวฟ่างบางชนิดใช้ทำไม้กวาด สีนั่งย้อม กาว กระดาษ และผ้า ดันแห้ง สามารถนำไปมุงหลังคาและ ปลูกบ้าน เป็นต้น (วัชร, 2542)

5. บ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี (Klity village, Kanchanaburi province)

แหล่งที่มีการปนเปื้อนตะกั่วที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้ คือ บ้านคลิตี้ ตำบลชะแล อำเภอดงพญาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี โดยเกิดการรั่วไหลของตะกอนดินและน้ำที่มีความเข้มข้นของตะกั่วปริมาณสูง ปนเปื้อนจากบ่อเก็บกักตะกอนลงสู่ลำห้วยคลิตี้ จากโรงแต่งแร่ของบริษัทตะกั่วคอนเซนเตรทส์ (ประเทศไทย) จำกัด ทำให้เกิดการสะสมของตะกอนตะกั่วตั้งแต่โรงแต่งแร่จนถึงท้ายน้ำ เป็นระยะทางกว่า 19 กิโลเมตร ในปี 2542 บริษัทตะกั่วคอนเซนเตรทส์ (ประเทศไทย) จำกัด ได้ดำเนินการขุดลอกตะกอนดิน

ริมฝั่งลำห้วยคลิตี้ในช่วง 2.5 กิโลเมตร จากจุดเริ่มของการปนเปื้อนประมาณ 3,753 ตัน จำแนกเป็นพื้นที่ฝั่งซ้ายของลำห้วย 1,136 ตัน ฝั่งขวาประมาณ 2,617 ตัน ซึ่งได้มีการจัดการ 2 วิธี ได้แก่ การขนกลับมาฝังกลบยังบ่อกักเก็บตะกอน (tailing pond) ภายในพื้นที่โรงแต่งแร่จำนวน 2,495 ตัน และทำการฝังกลบในหลุมกลบบริเวณฝั่งซ้ายและฝั่งขวาของลำห้วยจำนวน 1,258 ตัน จากการตรวจสอบในเดือนธันวาคม 2543 พบว่าการดำเนินการฝังกลบไม่เป็นไปตามหลักวิชาการ และพบการกักเซาะของน้ำฝนอยู่โดยทั่วไป ซึ่งในขณะนั้น บริษัทตะกั่วคอนเซนเตรทส์ (ประเทศไทย) จำกัด ได้ดำเนินการแก้ไขปัญหาโดยการขุดร่องน้ำเบี่ยงเบนทิศทางการไหลของน้ำฝน เพื่อลดปัญหาการกักเซาะ และปลูกพืชคลุมดินไว้เพื่อป้องกันการชะของหน้าดิน และในปี 2547 บริษัทตะกั่วคอนเซนเตรทส์ (ประเทศไทย) จำกัด ได้ดำเนินการถมบ่อกักเก็บตะกอน 2 บ่อ และบ่อกักเก็บน้ำใส 1 บ่อ พื้นที่รวม 15.4 ไร่ และฟื้นฟูโดยการปลูกยูคาลิปตัส สำหรับบ่อกักเก็บตะกอนอีกหนึ่งบ่อ ทำการถมทับด้วยหน้าดินและปล่อยให้น้ำท่วมขัง (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2552)

แม้ว่าจะมีการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับการปนเปื้อนของตะกั่วแล้ว แต่ก็ยังพบการกระจายตัวของตะกั่วในพื้นที่ต่าง ๆ ของหมู่บ้าน และพบว่าดินในพื้นที่มีการสะสมของตะกั่วในปริมาณมาก โดยได้มีการศึกษาและเก็บตัวอย่างดินในพื้นที่มาวิเคราะห์ปริมาณการปนเปื้อนของตะกั่ว พบว่า ที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร บริเวณริมห้วยคลิตี้มีปริมาณตะกั่วสูงที่สุด (140,560 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) ซึ่งค่ามาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการทำเกษตรกรรมและที่อยู่อาศัยกำหนดไว้ไม่เกิน 400 มิลลิกรัม/กิโลกรัม โดยค่าปริมาณตะกั่วในดินของบ้านคลิตี้ แสดงดังตารางที่ 1 (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2552)

ตารางที่ 1 ปริมาณตะกั่วในดินของบ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี

ลำดับที่	สถานที่	ความเข้มข้น (มก./กก.)
1	คลิตี้บน ไร่ข้างบ้านผู้ใหญ่	142
2	คลิตี้บน ข้างบ้านผู้ใหญ่ก่อนถึงลำห้วย	135
3	คลิตี้บน ข้างบ้านผู้ใหญ่หลังลำห้วย	125
4	จุด TK3 ลึก 50 เซนติเมตร	626
5	จุด TK3 ลึก 20 เซนติเมตร	688
6	คลิตี้ล่าง สะพานหน้าศูนย์เลี้ยงเด็ก	16,535
7	คลิตี้ล่าง น้ำตกธิดาลอย	68,102
8	ริมห้วยคลิตี้ ลึก 20 เซนติเมตร	140,560

นอกจากตะกั่วจะตกค้างในดินแล้ว ยังพบว่าการสะสมในพืชและเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารก่อให้เกิดความเป็นพิษ การเจ็บป่วยและการตาย ทั้งกับมนุษย์และสัตว์ในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เมล็ดพันธุ์

- 1.1 เมล็ดทานตะวันพันธุ์ โอเปร่า (ได้รับความอนุเคราะห์เมล็ดพันธุ์จากภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม)
- 1.2 เมล็ดข้าวฟ่างพันธุ์ เกเกยู 42 (ได้รับความอนุเคราะห์เมล็ดพันธุ์จากศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ จังหวัดนครราชสีมา)

2. ปุ๋ยเคมี

ใช้ปุ๋ยเคมีสูตร 16-20-0 และ 46-0-0

3. อุปกรณ์เตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้ในเรือนทดลอง

- 3.1 กระสอบพลาสติกขนาดบรรจุ 50 กิโลกรัม
- 3.2 จอบ
- 3.3 พลั่วมือ
- 3.4 ถังมือยาง

4. อุปกรณ์ปลูกพืชในเรือนทดลอง

- 4.1 ตัวอย่างดินที่ปนเปื้อนตะกั่วจากบ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี
- 4.2 ตัวอย่างดินที่ไม่ปนเปื้อนตะกั่วจากสถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน
- 4.3 กระถางพลาสติกเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร
- 4.4 บัวรดน้ำ
- 4.5 ส้อมพรวนดิน
- 4.6 ป้ายแสดงคำรับทดลอง

5. อุปกรณ์เก็บตัวอย่างพืชเพื่อวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

- 5.1 ถุงกระดาษสีน้ำตาลเบอร์ 2
- 5.2 กระดาษพลาสติกขนาด 35 x 50 เซนติเมตร
- 5.3 กรรไกร
- 5.4 มีด
- 5.5 ตลับเมตร

6. อุปกรณ์เก็บตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

- 6.1 ถุงพลาสติก
- 6.2 พลั่วมือ
- 6.3 ถุงมือยาง

7. อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน และตัวอย่างพืชในห้องปฏิบัติการ

- 7.1 เครื่องบดตัวอย่างพืช
- 7.2 เครื่องบดตัวอย่างดิน
- 7.3 ตู้อบลมร้อน (hot air oven)
- 7.4 ตะแกรงร่อนขนาด 0.5 มิลลิเมตร
- 7.5 Test tube ขนาด 75 มิลลิลิตร
- 7.6 Hot-block digestion
- 7.7 Fume hood
- 7.8 กระดาษกรอง
- 7.9 Whatman no. 42
- 7.10 Volumetric flask 50 มิลลิลิตร
- 7.11 ขวดพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร
- 7.12 Flame atomic absorption spectrophotometer (Spectra AA 200)
- 7.13 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

7.14 สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว (total Pb)

7.14.1 กรดผสม conc. HNO_3 : 70% HClO_4 : conc. $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$ (1:10) อัตราส่วน 11:4:10 v/v

7.14.2 กรดผสม conc. HNO_3 : conc. HClO_4 อัตราส่วน 5:1 v/v

7.14.3 น้ำปราศจากไอออน (deionized water)

7.14.4 สารละลายมาตรฐานตะกั่ว (Pb Standard) ที่ระดับความเข้มข้น 0.5, 1, 2, 4 และ 8 มิลลิกรัม/ลิตร

วิธีการ

1. การวางแผนการทดลอง

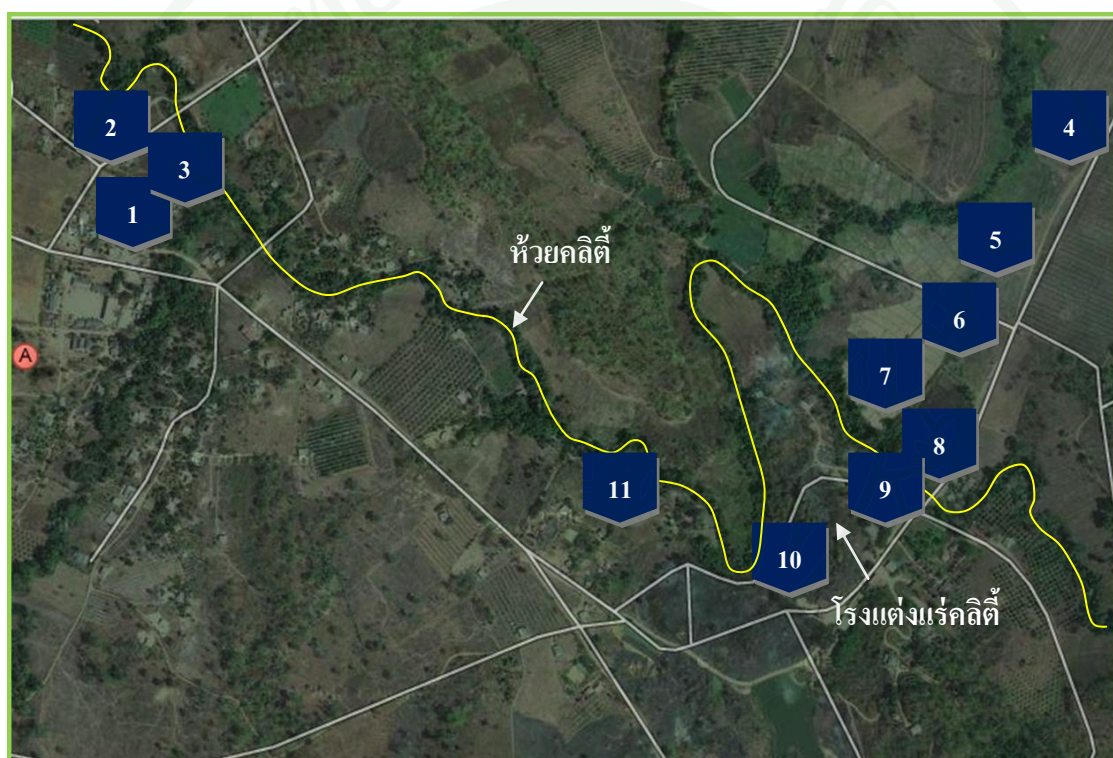
ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (complete randomized design, CRD) ทั้งหมด 13 ชุดการทดลอง แต่ละชุดการทดลองมี 5 ซ้ำ มีรายละเอียดดังนี้

1. ชุดการทดลองที่ 1 ปลูktan ตะวันในดินปนเปื้อนตะกั่วและเก็บเกี่ยวที่ระยะ 35 วัน
2. ชุดการทดลองที่ 2 ปลูktan ตะวันในดินปนเปื้อนตะกั่วและเก็บเกี่ยวที่ระยะ 70 วัน
3. ชุดการทดลองที่ 3 ปลูktan ตะวันในดินปนเปื้อนตะกั่วและเก็บเกี่ยวที่ระยะ 105 วัน
4. ชุดการทดลองที่ 4 ปลุกข้าวฟ่างในดินปนเปื้อนตะกั่วและเก็บเกี่ยวที่ระยะ 35 วัน
5. ชุดการทดลองที่ 5 ปลุกข้าวฟ่างในดินปนเปื้อนตะกั่วและเก็บเกี่ยวที่ระยะ 70 วัน
6. ชุดการทดลองที่ 6 ปลุกข้าวฟ่างในดินปนเปื้อนตะกั่วและเก็บเกี่ยวที่ระยะ 105 วัน
7. ชุดการทดลองที่ 7 ปลูktan ตะวันในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วและเก็บเกี่ยวที่ระยะ 35 วัน
8. ชุดการทดลองที่ 8 ปลูktan ตะวันในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วและเก็บเกี่ยวที่ระยะ 70 วัน
9. ชุดการทดลองที่ 9 ปลูktan ตะวันในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วและเก็บเกี่ยวที่ระยะ 105 วัน
10. ชุดการทดลองที่ 10 ปลุกข้าวฟ่างในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วและเก็บเกี่ยวที่ระยะ 35 วัน
11. ชุดการทดลองที่ 11 ปลุกข้าวฟ่างในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วและเก็บเกี่ยวที่ระยะ 70 วัน
12. ชุดการทดลองที่ 12 ปลุกข้าวฟ่างในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วและเก็บเกี่ยวที่ระยะ 105 วัน
13. ชุดการทดลองที่ 13 ดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่วแต่ไม่มีการปลูกพืช

2. การเก็บตัวอย่างดินเพื่อใช้ในเรือนทดลอง

2.1 การเก็บตัวอย่างดินปนเปื้อนตะกั่วบริเวณบ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี

ทำการสำรวจพื้นที่บริเวณบ้านคลิตี้ ตำบลชะแล อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี เพื่อหาพื้นที่ที่มีตัวอย่างดินปนเปื้อนตะกั่วที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นตัวแทนของดินใน โดยทำการเก็บตัวอย่างดินทั้งหมด 11 จุด ๆ ละ 3 ซ้ำ ดังภาพ



ภาพที่ 1 จุดเก็บตัวอย่างในการสำรวจปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในดินบ้านคลิตี้ ตำบลชะแล อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี

ตารางที่ 2 ปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วจากการสำรวจดินในพื้นที่บ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี

จุดเก็บตัวอย่าง	ปริมาณความเข้มข้นตะกั่ว (มก./กก.)
1	910.35
2	270.88
3	162.30
4	691.01
5	681.32
6	565.62
7	1252.33
8	1450.58*
9	33085.08
10	> 36992.75
11	1011.72

หมายเหตุ * คือจุดที่ใช้เป็นตัวแทนของดินในพื้นที่

เมื่อได้จุดที่เป็นตัวแทนของดินในพื้นที่แล้ว จึงเก็บตัวอย่างดินบริเวณนั้นจำนวน 400 กิโลกรัม โดยในการเก็บตัวอย่างดินเพื่อเป็นตัวแทนของดินในพื้นที่นั้น จะแบ่งเก็บเป็น 5 จุดย่อย เพื่อให้ได้ดินที่มีค่าปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วเฉลี่ยใกล้เคียงกันมากที่สุด จากนั้นนำดินที่เก็บจากบ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี มาตากให้แห้งในเรือนทดลองเป็นเวลา 2 สัปดาห์ จากนั้นทำการคลุกเคล้าดินให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วชั่งตัวอย่างดินที่คลุกเคล้าเสร็จแล้วใส่กระถาง กระถางละ 10 กิโลกรัม จำนวน 35 กระถาง

2.2 การเก็บตัวอย่างดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วจากสถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน

ใช้ตัวอย่างดินบริเวณด้านหลังสถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน โดยเก็บตัวอย่างดินจำนวน 350 กิโลกรัม ซึ่งแบ่งเก็บเป็น 5 จุด เพื่อให้ได้ตัวแทนของดินที่มีค่าปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วใกล้เคียงกันมากที่สุด จากนั้นนำมาตากให้แห้งในโรงเรือนเป็นเวลา 2 สัปดาห์ แล้วทำการคลุกเคล้า

ดินให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วชั่งตัวอย่างดินที่คลุกเคล้าเสร็จแล้วใส่กระถาง กระถางละ 10 กิโลกรัม จำนวน 30 กระถาง

3. การปลูกพืชในเรือนทดลอง

3.1 การเตรียมดิน

เมื่อชั่งตัวอย่างดินใส่กระถาง กระถางละ 10 กิโลกรัม เสร็จเรียบร้อยแล้ว นำกระถางดินทั้ง 2 ชนิด คือดินปนเปื้อนตะกั่วจากบ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี และดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วจากสถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน นำมาวางแบบสุ่มสมบูรณ์ตามแผนการทดลองที่ได้เตรียมไว้ข้างต้น จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างดินก่อนปลูกเพื่อวิเคราะห์ความอุดมสมบูรณ์ของดิน และปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดิน ทำการใส่ปุ๋ยรองพื้นก่อนปลูกสูตร 16-20-0 (เฉพาะดินปลูกทานตะวัน) และ 1 เดือนหลังปลูก (สำหรับข้าวฟ่าง) ในอัตรากระถางละ 0.8 กรัม และใส่ปุ๋ยสูตร 46-0-0 ที่ระยะ 1 เดือนหลังปลูกอีกครั้งเฉพาะกระถางปลูกทานตะวันเท่านั้น (ชูศักดิ์, 2542 และ วชิร, 2542) จากนั้นจึงทำการหยอดเมล็ดพืชทั้งสองชนิดในกระถาง กระถางละ 3 เมล็ด รดน้ำทุกวันในช่วงระหว่าง 7.00 น. – 8.00 น. หลังจากเมล็ดงอกแล้ว 2 สัปดาห์ ถอนแยกทานตะวันและข้าวฟ่างให้เหลือ 1 ต้น/กระถาง

3.2 การเก็บเกี่ยวแบ่งเป็นสามช่วงอายุ คือ

- เก็บเกี่ยวทานตะวันและข้าวฟ่างที่ระยะ 35 วัน
- เก็บเกี่ยวทานตะวันและข้าวฟ่างที่ระยะ 70 วัน
- เก็บเกี่ยวทานตะวันและข้าวฟ่างที่ระยะ 105 วัน

โดยก่อนที่จะเก็บเกี่ยวจะทำการวัดความสูงของพืชในแต่ละช่วงอายุก่อน จึงทำการเก็บเกี่ยว หลังจากเก็บเกี่ยวพืชแต่ละช่วงอายุ จะนำมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปา และแบ่งต้นพืชออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

- ที่ระยะ 35 วัน แบ่งเป็น ราก ลำต้นและใบ
- ที่ระยะ 70 วัน แบ่งเป็น ราก ลำต้นและใบ และดอก
- ที่ระยะ 105 วัน แบ่งเป็น ราก ลำต้นและใบ เปลือก และเมล็ด

4. การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

4.1 วิเคราะห์ชีวมวล

เมื่อแบ่งตัวอย่างพืชออกเป็นส่วนตัวต่าง ๆ แล้ว นำตัวอย่างพืชที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก(น้ำหนักสด) จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน แล้วนำออกจากตู้อบลมร้อน นำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง (น้ำหนักแห้ง) (Panich-Pat and Srinives, 2009)

4.2 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินก่อนการทดลอง

4.2.1 การกระจายขนาดของอนุภาคดิน (soil particle size distribution) โดยอนุภาคขนาดทราย ใช้วิธีการแยกด้วยตะแกรง (sieving method) ส่วนอนุภาคขนาดทรายแป้งและขนาดดินเหนียวใช้วิธีปิเปต (Gee and Bauder, 1986)

4.2.2 ปฏิกริยาดิน (soil reaction, pH) โดยใช้เครื่องวัดปฏิกริยาดิน (pH meter) ใช้อัตราส่วนดินต่อน้ำและดินต่อสารละลาย 1M KCl เท่ากับ 1:1 (Thomas, 1996)

4.2.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน โดยวิธี Walkley and Black Titration (Walkley and Black, 1946)

4.2.4 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available phosphorus) โดยวิธี Bray II แล้ววัดปริมาณฟอสฟอรัสด้วยเครื่อง spectrophotometer (Bray and Kurtz, 1945)

4.2.5 ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable potassium) โดยใช้ 1 M NH_4OAc (pH 7.0) (Pratt, 1965) แล้ววัดปริมาณโพแทสเซียมด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer

4.2.6 ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity) โดยการซึมชะแคตไอออนด้วยสารละลาย 1 M NH_4OAc ที่เป็นกลาง (pH 7.0) และแทนที่แอมโมเนียมไอออนด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (10%) ในสภาพกรด จากนั้นทำการกลั่นหาแอมโมเนียมไอออนแล้วคำนวณค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน (Chapman, 1965)

4.2.7 การนำไฟฟ้า (electrical conductivity) โดยวัดสภาพการนำไฟฟ้าของสารสกัดจากสารละลายดินที่อิ่มตัว (saturation extract) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่อง electrical conductivity (Rhoades, 1996)

4.3 วิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในดิน

นำตัวอย่างดินที่ได้ผึ่งไว้ที่อุณหภูมิห้องควรหลีกเลี่ยงไม่ให้ถูกแสงแดดส่องถึง และต้องผึ่งจนตัวอย่างแห้งสนิท จากนั้นนำตัวอย่างดินมาบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ชั่งตัวอย่างดิน 0.2 กรัม ใส่ใน test tube ขนาด 75 มิลลิลิตร เติม conc. HNO_3 : conc. HClO_4 และ conc. $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$ (1/10 v/v) อัตราส่วน 10:4:10 จำนวน 12 มิลลิลิตร นำหลอดทดลองใส่ใน hot-block digestion ภายใต้ fume hood ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องให้อยู่ในช่วง 210 องศาเซลเซียส ย่อยสลายตัวอย่างจนได้สารละลายใส ย้ายหลอดทดลองมาวางในตะแกรงวางหลอดทดลองแล้วทิ้งไว้ให้เย็น กรองสารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง Whatman no. 42 ใส่ลงใน volumetric flask ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรจนถึงขีดด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำสารละลายที่ได้ใส่ขวดพลาสติกขนาด 60 มิลลิลิตร ปิดฝาให้สนิทเพื่อเตรียมไว้สำหรับวิเคราะห์ขั้นต่อไป ควรทำ blank ไปพร้อมกับตัวอย่าง (Amacher, 1996)

4.4 วิเคราะห์ความเข้มข้นของตะกั่วทั้งหมดในพืช

หลังจากอบพืชและชั่งน้ำหนักแห้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำตัวอย่างพืชที่ผ่านการอบไปบดด้วยเครื่องบดตัวอย่างพืช บดจนละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร จากนั้นชั่งตัวอย่างพืช 0.5 กรัม ใส่ใน test tube ขนาด 75 มิลลิลิตร เติม conc. HNO_3 และ conc. HClO_4 อัตราส่วน 5:1 จำนวน 6 มิลลิลิตร นำหลอดทดลองใส่ใน hot-block digestion ภายใต้ fume hood ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องให้อยู่ในช่วง 210 องศาเซลเซียส ย่อยสลายตัวอย่างจนได้สารละลายใส ย้ายหลอดทดลองมาวางในตะแกรงวางหลอดทดลองแล้วทิ้งไว้ให้เย็น กรองสารละลายตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง What-man no. 42 ใส่ลงใน volumetric flask ขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรจนถึงขีดด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำสารละลายที่ได้ใส่ขวดพลาสติกขนาด 60 มิลลิลิตร ปิดฝาให้สนิทเพื่อเตรียมไว้สำหรับวิเคราะห์ขั้นต่อไป โดยทำ blank พร้อมไปกับตัวอย่าง (Abreu *et al.*, 1997)

4.5 วิเคราะห์ความเข้มข้นตะกั่วในสารละลายดินและพืช

เมื่อได้สารละลายใสที่ผ่านการกรองเรียบร้อยแล้ว นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (Anonymous, 1970)

ตารางที่ 3 สมบัติทางเคมีและกายภาพของดินที่ใช้ทดลอง

สมบัติทางเคมีและกายภาพ	ดินปนเปื้อนตะกั่ว	ดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว
Texture :	Clay Loam	Clay Loam
Sand (%)	24.14	35.72
Silt (%)	48.71	36.92
Clay (%)	27.15	27.36
pH (1:1 soil : water)	7.18	7.54
EC (dS m ⁻¹)	0.69	0.62
Organic matter (%)	6.62	1.05
Available P (mg kg ⁻¹)	42.84	131.38
Exchangeable K (mg kg ⁻¹)	417.0	123.97
CEC (cmol kg ⁻¹)	24.46	5.21
Total soil Pb (mg kg ⁻¹)	1450.15	35.08

5. การเก็บข้อมูล

5.1 การเก็บข้อมูลดินก่อนปลูก โดยเก็บข้อมูล texture, pH, organic matter, CEC, EC (วิเคราะห์โดยรวมทั้งหมด) และ total soil lead (วิเคราะห์แยกในแต่ละหน่วยทดลอง)

5.2 เก็บข้อมูลดินหลังปลูก โดยเก็บข้อมูล total soil lead (วิเคราะห์แยกในแต่ละหน่วยทดลอง)

5.3 การเก็บข้อมูลพืช โดยเก็บข้อมูลดังนี้

- น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง
- ความเข้มข้นของตะกั่วในชีวมวลของทานตะวันและข้าวฟ่างที่ระยะ 35, 70 และ 105 วัน
- ความเข้มข้นของตะกั่วในรากและส่วนเหนือดินที่ระยะ 35 วัน
- ความเข้มข้นของตะกั่วในราก ลำต้นและใบ และดอก (สำหรับทานตะวัน) และความเข้มข้นของตะกั่วในราก ลำต้นและใบ และช่อดอก (สำหรับข้าวฟ่าง) ที่ระยะ 70 วัน
- ความเข้มข้นของตะกั่วในราก ลำต้นและใบ จานดอก เปลือกหุ้มเมล็ด และเมล็ด (สำหรับทานตะวัน) และความเข้มข้นของตะกั่วในราก ลำต้นและใบ ก้านช่อดอกและเปลือกหุ้มเมล็ด และเมล็ด (สำหรับข้าวฟ่าง) ที่ระยะ 105 วัน

5.4 คำนวณค่า Tolerance index (TI) จากสูตร (Nui *et al.*, 2006)

$$TI = \frac{B_{\text{Treatment}}}{B_{\text{Control}}}$$

หมายเหตุ $B_{\text{treatment}}$ = น้ำหนักแห้งของพืชที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว
 B_{control} = น้ำหนักแห้งของพืชที่ปลูกในดินที่ไม่มีการปนเปื้อนตะกั่ว

5.5 คำนวณค่า Bioconcentration factor (BCF) จากสูตร (Yoon *et al.*, 2006)

$$BCF = \frac{Pb_{\text{Plant (total)}}}{Pb_{\text{Soil (total)}}}$$

หมายเหตุ $Pb_{\text{Plant (total)}}$ = ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในต้นพืช
 $Pb_{\text{Soil (total)}}$ = ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดิน

5.6 คำนวณค่า Translocation factor (TF) จากสูตร (Yoon *et al.*, 2006)

$$TF = \frac{Pb_{\text{Plant (shoot)}}}{Pb_{\text{Plant (root)}}}$$

หมายเหตุ $Pb_{\text{Plant (shoot)}}$ = ปริมาณตะกั่วในส่วนเหนือดินของพืช
 $Pb_{\text{Plant (root)}}$ = ปริมาณตะกั่วในส่วนราก

5.7 คำนวณค่า Uptake by plant (UP) จากสูตร

$$UP = B_{\text{Treatment}} \times Pb_{\text{in whole plant}}$$

หมายเหตุ $B_{\text{Treatment}}$ = คือน้ำหนักแห้งของพืชที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว
 $Pb_{\text{in whole plant}}$ = คือความเข้มข้นตะกั่วทั้งหมดในพืช

6. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี Analysis of variance (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($P < 0.05$) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของชุดการทดลองด้วยวิธี *t*-Student test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($P < 0.05$) และ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($P < 0.05$)

7. สถานที่ทำการทดลอง

7.1 เรือนทดลองที่ 8 หน่วยอนุรักษ์พันธุ์พืชและการใช้ประโยชน์ ฝ่ายปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง สถาบันวิจัยและพัฒนากำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

7.2 ห้องปฏิบัติการทางเคมี หน่วยวิเคราะห์ วิจัย ดิน พืช และวัสดุเกษตร ฝ่ายปฏิบัติการวิจัยและเรือนปลูกพืชทดลอง สถาบันวิจัยและพัฒนากำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

7.3 ห้องปฏิบัติการเตรียมสารเคมี สาขาชีววิทยา สายวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

7.3 ห้องปฏิบัติการทางเคมี โครงการจัดตั้งสาขาวิชาเคมี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

8. ระยะเวลาทำการทดลอง

ดำเนินการทดลองในช่วงเดือนมิถุนายน 2554 และสิ้นสุดในเดือนพฤษภาคม 2555

ผลและวิจารณ์

ผล

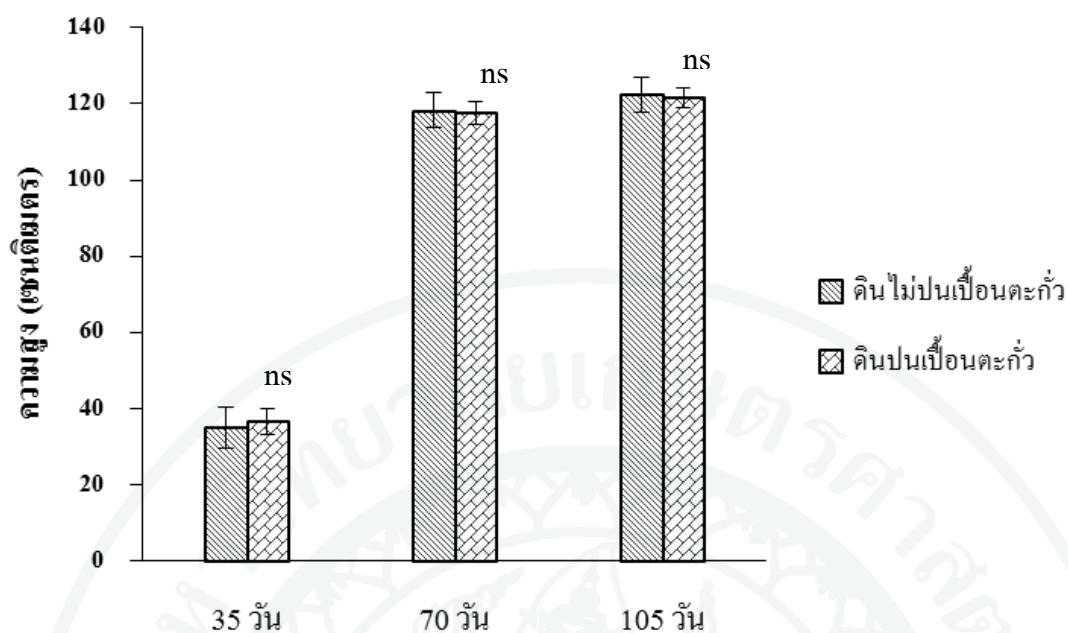
1. การเจริญเติบโตของทานตะวันและข้าวฟ่าง

1.1 การเจริญเติบโตของทานตะวัน

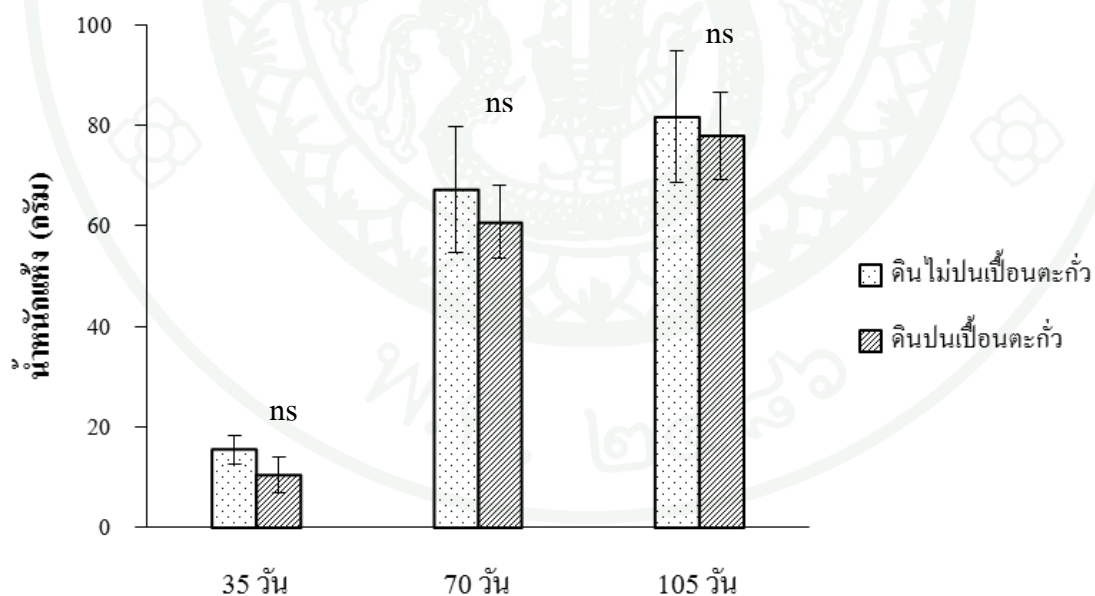
จากการศึกษาการเจริญเติบโตของทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่วที่ระยะต่าง ๆ สามระยะ คือ 35 วัน 70 วัน และ 105 วัน โดยพิจารณาจากความสูง และน้ำหนักแห้งพบว่า เมื่อวิเคราะห์ความสูงในแต่ละระยะทางสถิติ พบว่า ความสูงของทานตะวันในระยะ 35, 70 และ 105 วัน ที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วและทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) โดยที่ระยะ 35 วัน ทานตะวันที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีความสูง 35.0 ± 5.2 เซนติเมตร ส่วนทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนมีความสูง 36.6 ± 3.2 เซนติเมตร ที่ระยะ 70 วัน ทานตะวันที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีความสูง 118.2 ± 4.6 เซนติเมตร ส่วนทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนมีความสูง 117.6 ± 2.9 เซนติเมตร และที่ระยะ 105 วัน ทานตะวันที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีความสูง 122.4 ± 4.7 เซนติเมตร ส่วนทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนมีความสูง 121.6 ± 2.7 เซนติเมตร (รูปที่ 2)

ด้านน้ำหนักแห้งของทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว พบว่าที่ระยะ 35, 70 และ 105 วัน ทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีการสะสมน้ำหนักแห้งที่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) โดยทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วที่ระยะเก็บเกี่ยว 35 วัน มีน้ำหนักแห้ง 10.4 ± 2.8 กรัม ส่วนทานตะวันที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีน้ำหนักแห้ง 15.5 ± 2.8 กรัม ที่ระยะเก็บเกี่ยว 70 วัน ทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีน้ำหนักแห้ง 60.8 ± 7.3 กรัม ขณะที่ทานตะวันปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีน้ำหนักแห้ง 67.2 ± 2.4 และที่ระยะ 105 วัน ทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วที่มีน้ำหนักแห้ง 78.0 ± 8.7 กรัม ส่วนในดินไม่ปนเปื้อนมีน้ำหนักแห้ง 81.8 ± 13.1 กรัม (รูปที่ 3)

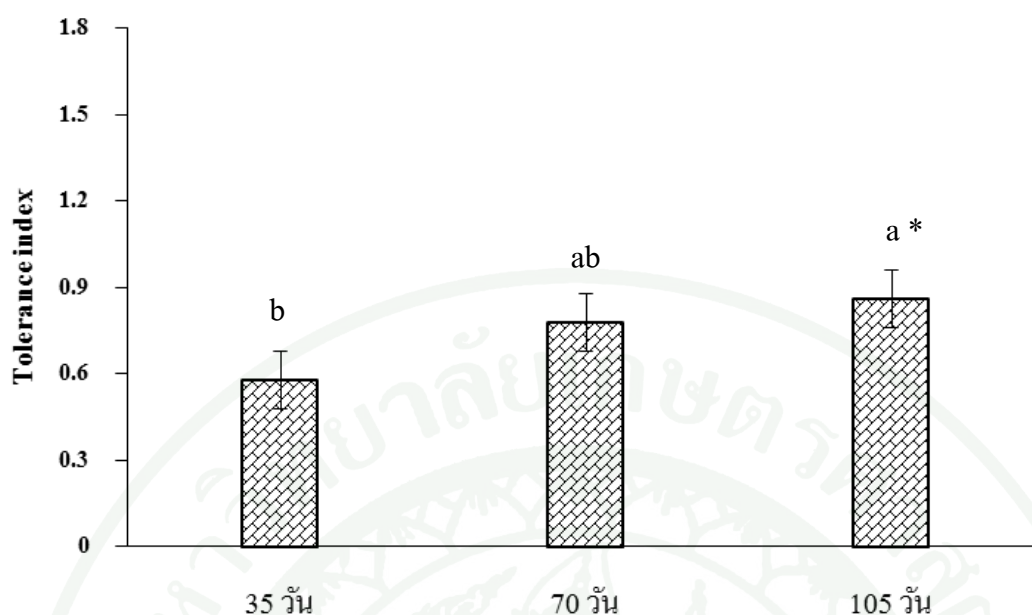
เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีในการทนทานต่อสารพิษ (Tolerance Index, TI) ของทานตะวันที่ระยะต่าง ๆ พบว่า ค่า TI มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยที่ระยะ 105 วัน มีค่า TI สูงที่สุด (0.86 ± 0.09) และที่ระยะ 35 วันมีค่า TI ต่ำที่สุด (0.58 ± 0.14) (รูปที่ 4)



ภาพที่ 2 ความสูงของทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว (ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) เปรียบเทียบด้วยวิธี *t*-Student test)



ภาพที่ 3 น้ำหนักแห้งของทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว (ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) เปรียบเทียบด้วยวิธี *t*-Student test)

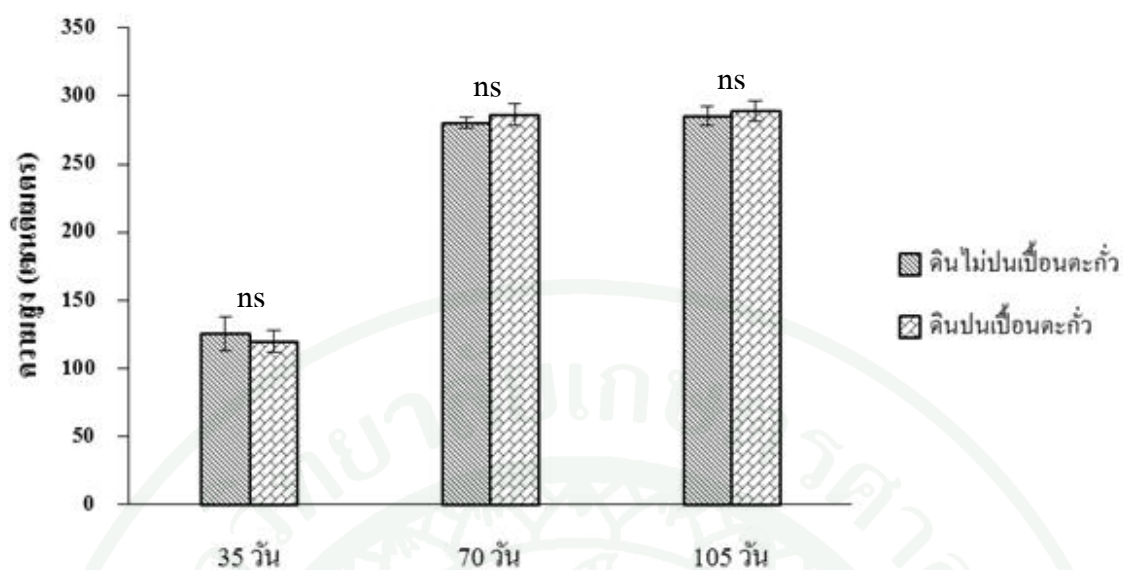


ภาพที่ 4 ค่า Tolerance Index ของทานตะวัน (* ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และ a,b และ c แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลอง โดยเปรียบเทียบด้วยวิธี DMRT)

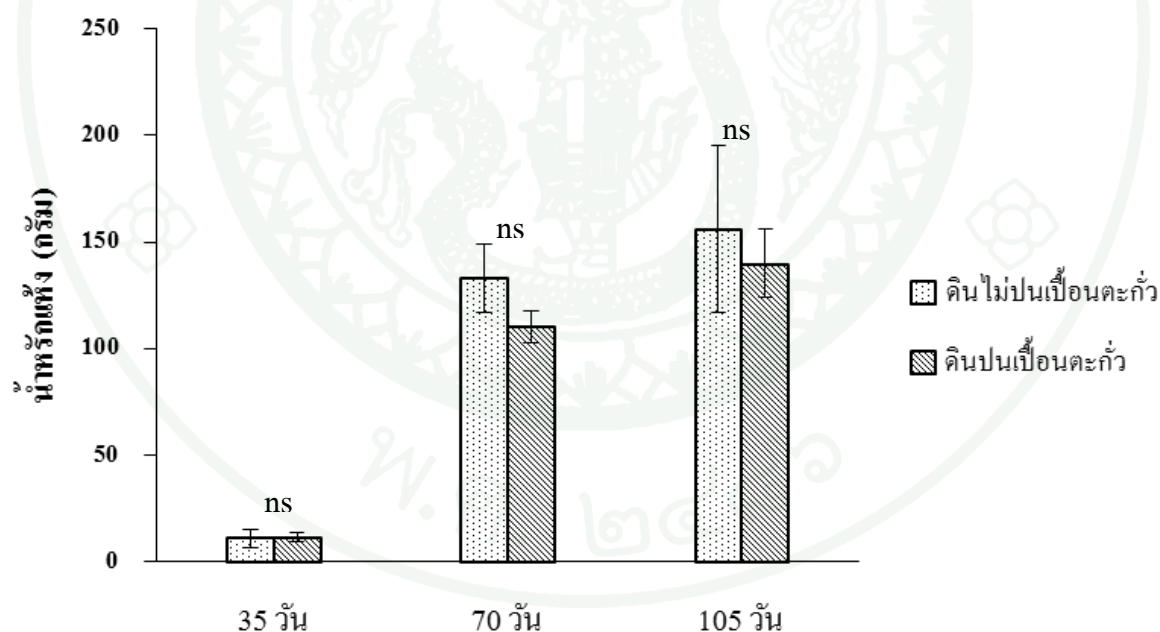
1.2 การเจริญเติบโตของข้าวฟ่าง

การเจริญเติบโตของข้าวฟ่างจะพิจารณาจากความสูงและน้ำหนักแห้งเช่นเดียวกับทานตะวัน ซึ่งพบว่า ความสูงของข้าวฟ่างทั้งสามระยะไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยที่ระยะ 35 วัน, 70 วัน และ 105 วัน ข้าวฟ่างที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีความสูง 125.4 ± 12.4 เซนติเมตร, 280.5 ± 4.6 เซนติเมตร และ 285.5 ± 6.6 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีความสูง 119.8 ± 7.6 เซนติเมตร, 286.3 ± 7.6 เซนติเมตร และ 288.9 ± 7.9 เซนติเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 5)

ส่วนน้ำหนักแห้งของข้าวฟ่าง พบว่าข้าวฟ่างที่ระยะ 105 วัน มีการสะสมน้ำหนักแห้งสูงที่สุด รองลงมาคือที่ระยะ 70 วัน และ 35 วัน ตามลำดับ โดยข้าวฟ่างทุกระยะการเก็บเกี่ยวมีการสะสมน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 35 วัน ที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีน้ำหนักแห้ง 11.1 ± 4.3 กรัม ส่วนข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีน้ำหนักแห้ง 11.4 ± 2.3 กรัม ที่ระยะ 70 วัน ข้าวฟ่างที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีน้ำหนัก



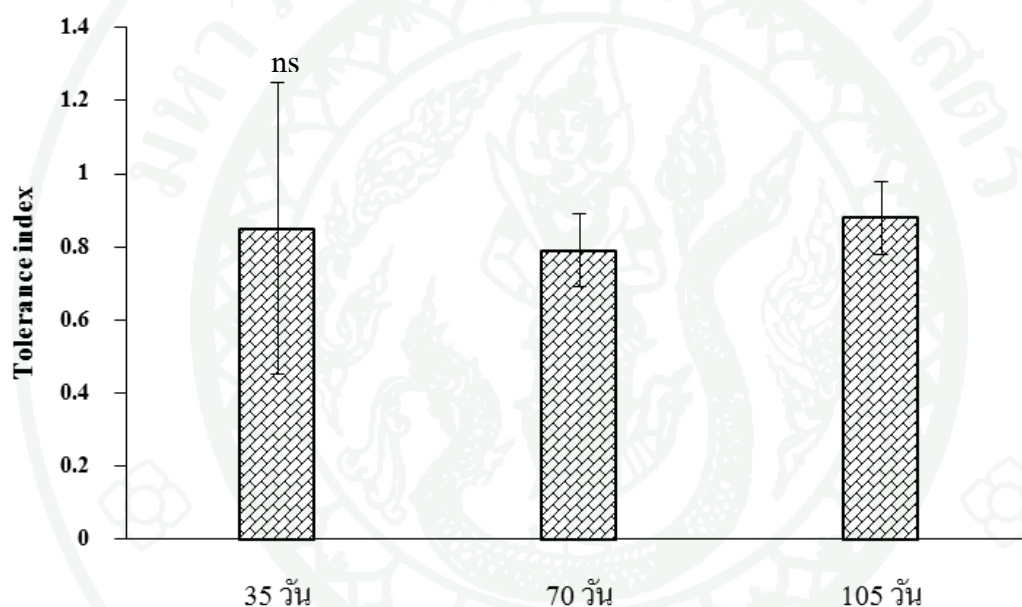
ภาพที่ 5 ความสูงของข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว (ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) เปรียบเทียบด้วยวิธี *t*-Student test)



ภาพที่ 6 น้ำหนักแห้งของข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่ว (ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) เปรียบเทียบด้วยวิธี *t*-Student test)

แห้ง 133.1 ± 16.1 กรัม ส่วนข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีน้ำหนักแห้ง 110.3 ± 7.5 กรัม และที่ระยะ 105 วัน ข้าวฟ่างที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีน้ำหนักแห้ง 156.1 ± 39.2 กรัม ส่วนข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีน้ำหนักแห้ง 139.9 ± 16.1 กรัม (รูปที่ 6)

ค่าดัชนีในการทนทานต่อสารพิษ (Tolerance Index, TI) ของข้าวฟ่างพบว่า ค่า TI ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน มีค่า TI สูงที่สุด (0.88 ± 0.1) และข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 70 วัน มีค่า TI ต่ำที่สุด (0.79 ± 0.08) (รูปที่ 7)

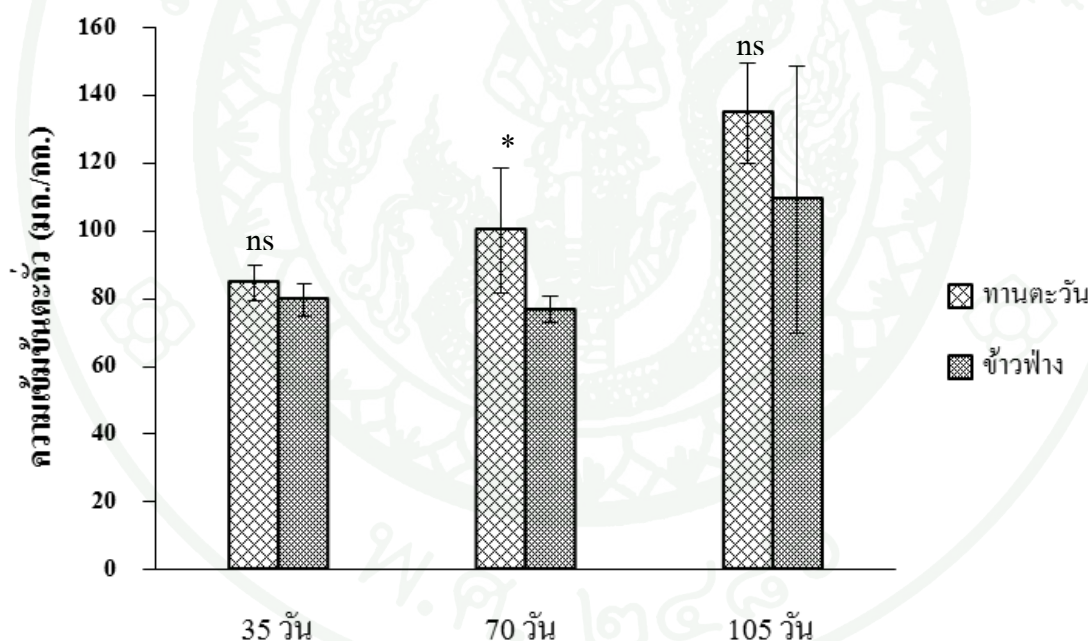


ภาพที่ 7 ค่า Tolerance Index ของข้าวฟ่าง (ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยเปรียบเทียบด้วยวิธี DMRT)

2. ความเข้มข้นของตะกั่วในทานตะวันและข้าวฟ่าง

2.1 ความเข้มข้นของตะกั่วในรากทานตะวันและข้าวฟ่าง

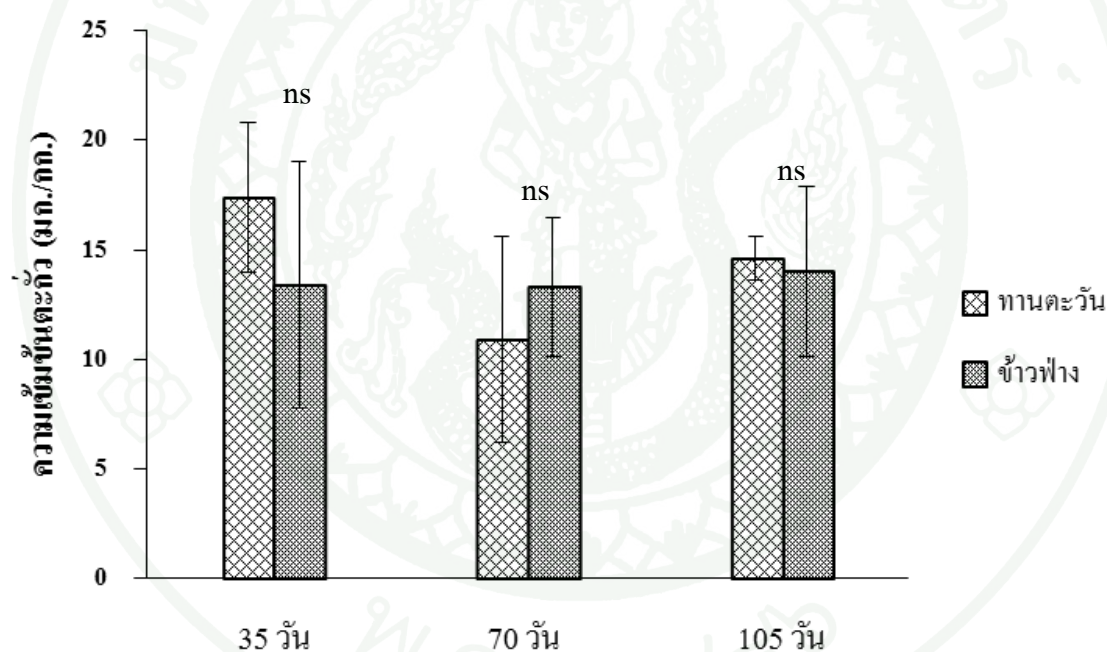
เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของตะกั่วในรากทานตะวันและข้าวฟ่าง พบว่าที่ระยะการเก็บ 35 และ 105 วัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.01$) โดยทานตะวันและข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน มีความเข้มข้นตะกั่วในรากสูงที่สุด (134.82 ± 14.90 และ 109.24 ± 39.44 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) ที่ระยะ 35 วัน ทานตะวันและข้าวฟ่างมีความเข้มข้นตะกั่วในราก 84.66 ± 5.10 และ 79.69 ± 4.87 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ขณะที่ระยะเก็บเกี่ยว 70 วัน พบว่าความเข้มข้นตะกั่วในรากมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยทานตะวันมีการสะสมตะกั่วในราก 100.36 ± 18.85 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนข้าวฟ่างมีการสะสมตะกั่วในราก 76.80 ± 3.94 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (รูปที่ 8)



ภาพที่ 8 ความเข้มข้นตะกั่วในรากทานตะวันและข้าวฟ่าง (* ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$), ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) เปรียบเทียบด้วยวิธี *t*-Student test)

2. 2 ความเข้มข้นของตะกั่วในลำต้นและใบของทานตะวันและข้าวฟ่าง

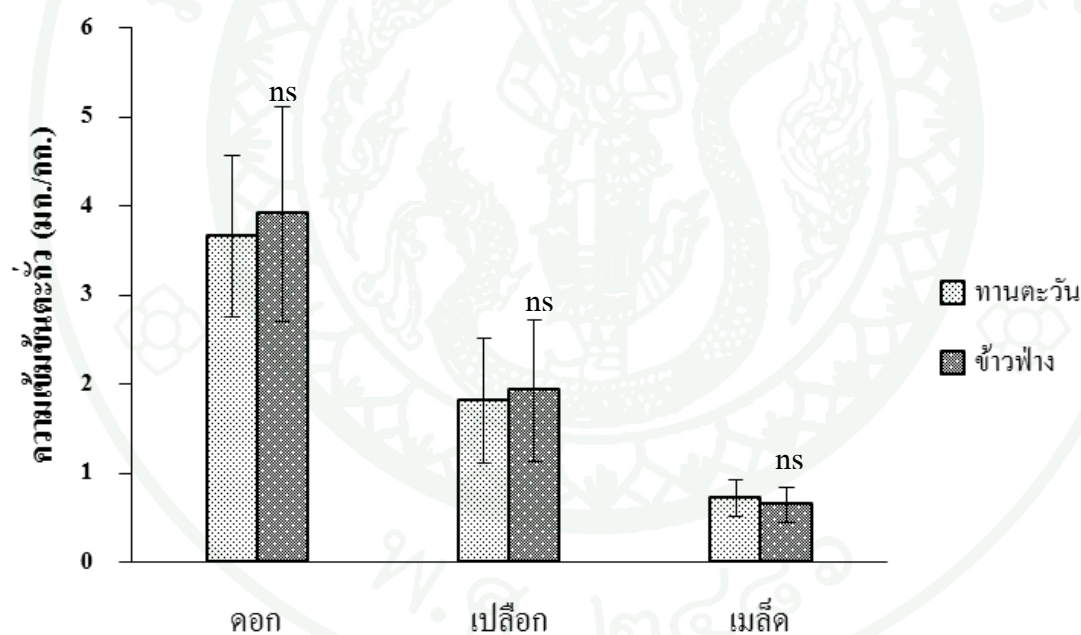
ความเข้มข้นของตะกั่วในลำต้นและใบของทานตะวันและข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 35, 70 และ 105 วัน พบว่าทานตะวันและข้าวฟ่างมีความเข้มข้นตะกั่วในลำต้นและใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ที่ระยะเก็บเกี่ยว 35 วัน พบว่าทานตะวันและข้าวฟ่างมีความเข้มข้นของตะกั่วในลำต้นและใบ 17.47 ± 3.40 และ 13.47 ± 5.48 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ความเข้มข้นตะกั่วที่ระยะเก็บเกี่ยว 70 วัน พบว่าทานตะวันมีความเข้มข้นตะกั่วในลำต้นและใบ 10.95 ± 4.76 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนข้าวฟ่างมีความเข้มข้นตะกั่วในลำต้นและใบ 13.38 ± 2.37 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน ทานตะวันมีความเข้มข้นตะกั่วในลำต้นและใบเท่ากับ 14.69 ± 1.03 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนข้าวฟ่างมีความเข้มข้นตะกั่วในลำต้นและใบ 14.04 ± 3.59 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (รูปที่ 9)



ภาพที่ 9 ความเข้มข้นตะกั่วในลำต้นและใบของทานตะวันและข้าวฟ่าง (ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) เปรียบเทียบด้วยวิธี *t*-Student test)

2.3 ความเข้มข้นของตะกั่วในดอก เปลือก และเมล็ดทานตะวันและข้าวฟ่าง

ความเข้มข้นของตะกั่วในดอกของทานตะวันและข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 70 วัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) จากการทดลองพบว่าทานตะวันและข้าวฟ่างความเข้มข้นของตะกั่วในดอก 3.66 ± 0.95 และ 3.91 ± 1.20 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ความเข้มข้นของตะกั่วในเปลือกของทานตะวันและข้าวฟ่าง ซึ่งทำการเก็บเกี่ยวที่ระยะ 105 วัน พบว่า มีความเข้มข้นตะกั่วที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) โดยทานตะวันมีความเข้มข้นของตะกั่วในเปลือก 1.82 ± 0.71 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนข้าวฟ่างมีความเข้มข้นตะกั่ว 1.93 ± 0.8 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ด้านความเข้มข้นของตะกั่วในเมล็ดของทานตะวันและข้าวฟ่างซึ่งเก็บเกี่ยวที่ระยะ 105 วัน พบว่าความเข้มข้นตะกั่วในเมล็ดพืชทั้งสองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) โดยเมล็ดทานตะวันที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 0.72 ± 0.25 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนเมล็ดข้าวฟ่างมีความเข้มข้นตะกั่ว 0.65 ± 0.21 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (รูปที่ 10)



ภาพที่ 10 ปริมาณความเข้มข้นตะกั่วในดอก เปลือก และเมล็ดของทานตะวันและข้าวฟ่าง (ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) เปรียบเทียบด้วยวิธี *t*-Student test)

2.4 เปรียบเทียบการสะสมตะกั่วในทานตะวันและข้าวฟ่าง

การเปรียบเทียบการสะสมตะกั่วในทานตะวันและข้าวฟ่าง พบว่า ความเข้มข้นของตะกั่วในรากทานตะวันและข้าวฟ่างมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยทานตะวันที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน มีความเข้มข้นของตะกั่วในรากสูงที่สุด (134.82 ± 14.90 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) รองลงมาคือข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน มีความเข้มข้นตะกั่วในราก 109.24 ± 39.44 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (ตารางที่ 4) ในด้านความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนของลำต้นและใบของทานตะวันและข้าวฟ่าง พบว่าความเข้มข้นของตะกั่วในลำต้นและใบของทานตะวันและข้าวฟ่างไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยทานตะวันที่ระยะเก็บเกี่ยว 35 วัน มีความเข้มข้นของตะกั่วในลำต้นและใบสูงที่สุด (17.47 ± 3.40 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) รองลงมาคือทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วที่ระยะ 105 วัน ซึ่งมีความเข้มข้นของตะกั่วใกล้เคียงกัน (14.69 ± 1.03 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และ 14.04 ± 3.59 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) ความเข้มข้นของตะกั่วในดอกของทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูก พบว่าความเข้มข้นตะกั่วในดอกของพืชทั้งสองชนิดไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยความเข้มข้นตะกั่วในดอกทานตะวันและข้าวฟ่างมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 3.66 ± 0.95 และ 3.91 ± 1.53 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4) ความเข้มข้นของตะกั่วในเปลือกของทานตะวันและข้าวฟ่าง พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยทานตะวันมีความเข้มข้นตะกั่วในเปลือก 1.82 ± 0.71 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนข้าวฟ่างมีความเข้มข้นตะกั่วในเปลือก 1.93 ± 0.80 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ความเข้มข้นตะกั่วในเมล็ดของทานตะวันและข้าวฟ่าง พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยเมล็ดทานตะวันมีความเข้มข้นตะกั่ว 0.72 ± 0.25 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนเมล็ดข้าวฟ่างมีความเข้มข้นตะกั่ว 0.65 ± 0.21 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ด้านความเข้มข้นตะกั่วรวมทั้งต้นของพืชทั้งสองชนิดพบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยทานตะวันที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน มีความเข้มข้นตะกั่วรวม 150.9 ± 15.8 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน มีความเข้มข้นตะกั่วรองลงมา (125.3 ± 36.6 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของทานตะวันและข้าวฟ่าง

ชุดการทดลอง	ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของพืช (มิลลิกรัม/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) [†]				
		ราก	ลำต้นและใบ	ดอก	เปลือก	เมล็ด
ทานตะวัน	35	84.66±5.10 b	17.47±3.40			102.1±3.4 b
	70	100.36±18.85 ab	10.95±4.76	3.66±0.95		114.9±21.0 b
	105	134.82±14.90 a	14.69±1.03		1.82±1.71	0.72±0.65
ข้าวฟ่าง	35	79.69±4.87 b	13.47±5.68			93.4±8.2 b
	70	76.80±3.94 b	13.38±3.27	3.91±1.53		94.0±1.5 b
	105	109.24±39.4 ab	14.04±3.59		1.93±1.28	0.65±0.21
ANOVA (F-test)		*	ns ^{1/}	ns ^{2/}	ns ^{2/}	ns ^{2/}

หมายเหตุ ; * ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ในคอลัมน์ (a มากกว่า b), ns^{1/} ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) เปรียบเทียบโดยวิธี DMRT, ns^{2/} ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) เปรียบเทียบด้วยวิธี t-Student test, [†] ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 5 ซ้ำ และค่า standard deviation (S.D.)

3. ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายตะกั่ว

3.1 ปัจจัยความเข้มข้นชีวภาพ (Bioconcentration factor, BCF)

ปัจจัยความเข้มข้นชีวภาพ (BCF) แสดงถึงประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากดินเข้ามาสะสมในพืช ซึ่งพบว่าทานตะวันและข้าวฟ่างมีค่า BCF แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยทานตะวันที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วันมีค่า BCF สูงที่สุด (0.11 ± 0.02) รองลงมาคือข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน (0.09 ± 0.03) ส่วนข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 35 วัน มีค่า BCF ต่ำสุด (0.06 ± 0.01) (ตารางที่ 5)

3.2 การเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากสู่ส่วนเหนือดินของพืช (Translocation factor, TF)

การเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากสู่ส่วนเหนือดินของพืช (TF) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของพืชในการเคลื่อนย้ายตะกั่วขึ้นมาสะสมในส่วนที่สามารถเก็บเกี่ยวได้สะดวก (harvestable parts) ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่า TF ของทานตะวันและข้าวฟ่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยทานตะวันที่ระยะเก็บเกี่ยว 35 วัน มีค่า TF สูงสุด (0.21 ± 0.05) รองลงมาคือข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 70 วัน (0.20 ± 0.05) และทานตะวันที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน มีค่า TF ต่ำที่สุด (0.13 ± 0.01) (ตารางที่ 5)

3.3 การดูดซับตะกั่วโดยพืช (Uptake by plant, UP)

การดูดซับตะกั่วโดยพืช (UP) คือค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพที่แท้จริงของพืชหนึ่งต้นในการดูดซับตะกั่วเข้ามาในเนื้อเยื่อส่วนต่าง ๆ จากการทดลองพบว่า ข้าวฟ่างที่ระยะ 105 วัน มีค่า UP สูงที่สุด 18.05 ± 0.96 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ขณะที่ทานตะวันที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน และข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 70 วัน มีค่า UP ใกล้เคียงกัน (11.3 ± 1.57 และ 10.17 ± 0.83 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) และทานตะวันที่ระยะเก็บเกี่ยว 35 วัน มีค่า UP ต่ำที่สุด (0.61 ± 0.13) (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 ค่า Bioconcentration factor, Translocation factor และ Uptake by plant ของทานตะวันและข้าวฟ่าง

ชุดการทดลอง	ระยะเวลา (วัน)	Bioconcentration factor [†]	Translocation factor [†]	Uptake by plant (mg) [†]
ทานตะวัน	35	0.07±0.01 b	0.21±0.05	0.61±0.13 d
	70	0.08±0.01 b	0.14±0.05	5.02±1.48 c
	105	0.11±0.02 a	0.13±0.01	11.30±1.57 b
ข้าวฟ่าง	35	0.06±0.01 b	0.17±0.06	0.85±0.24 d
	70	0.07±0.01 b	0.20±0.05	10.17±0.83 b
	105	0.09±0.03 ab	0.16±0.07	18.05 ±0.96 a
ANOVA (F-test)		*	ns	**

หมายเหตุ ; ** ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) เปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ในคอลัมน์ (a มากกว่า b และ c), * ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ในคอลัมน์ (a มากกว่า b), ns ค่าเฉลี่ยแต่ละชุดทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ, [†] ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 5 ซ้ำ และค่า standard deviation (S.D.)

วิจารณ์

1. การเจริญเติบโตของทานตะวันและข้าวฟ่าง

การเจริญเติบโตของทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่วนั้นจะพิจารณาจากความสูง น้ำหนักแห้ง และค่าดัชนีในการทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีโลหะหนักเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตของพืช จากผลที่ได้จากการทดลองจะเห็นว่าทั้งทานตะวันและข้าวฟ่างที่เจริญเติบโตในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีความสูงที่ไม่แตกต่างกัน สอดคล้องกับ Ullah *et al.* (2011) ศึกษาการสะสมโลหะหนักโดยทานตะวันซึ่งปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักสามชนิด คือ ตะกั่ว โครเมียม และแคดเมียม พบว่า ทานตะวันที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่วสามระดับความเข้มข้นคือ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัม/กิโลกรัม มีความสูงไม่แตกต่างกัน และเมื่อมีการเติม EDTA จาก 0 มิลลิโมล เป็น 5 มิลลิโมล ความสูงของทานตะวันที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนของตะกั่วทั้งสามระดับความเข้มข้นก็ยังมีค่าสูงเฉลี่ยไม่แตกต่างจากดินที่ไม่มีการเติม EDTA

ด้านน้ำหนักแห้งของทานตะวันและข้าวฟ่างนั้นพบว่า ทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีการสะสมน้ำหนักแห้งใกล้เคียงกัน อาจเป็นเพราะในดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่วมีปริมาณอินทรีย์วัตถุและความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) สูงกว่าดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว ดังนั้นในดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว ตะกั่วมีโอกาสในการสร้างพันธะกับอินทรีย์วัตถุในดิน ส่งผลให้ตะกั่วในดินถูกตรึงเอาไว้ พืชที่เจริญเติบโตในดินเหล่านี้จึงสามารถดูดดึงตะกั่วเข้ามาสะสมในส่วนต่างๆ ได้ลดลง ส่งผลให้ความเป็นพิษของตะกั่วที่มีต่อพืชลดลง พืชที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่วจึงมีการเจริญเติบโตที่ไม่ต่างกัน (Greger, 1999) สอดคล้องกับ Ullah *et al.* (2011) รายงานว่า น้ำหนักแห้งของทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วสามระดับความเข้มข้น คือ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ไม่มีความแตกต่างกัน ขณะที่ Panich-Pat and Srinives, (2009) ศึกษาการสะสมของตะกั่วในส่วนต่างๆ ของข้าว พบว่าความเข้มข้นของตะกั่วตั้งแต่ 0-3,000 มิลลิกรัม/ลิตร ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตทางกายภาพของข้าว โดยปกติพืชมักมีกลไกในการป้องกันความเป็นพิษของโลหะหนักต่อเซลล์พืช เช่นกลไกการสร้างพันธะระหว่างโลหะหนักกับเมทาโลไธโอนีน (metallothioneins) และกลไกการคีเลต (phytochelatins) กลไกทั้งสองประเภทจะส่งผลให้โลหะหนักที่เข้าสู่เซลล์พืชมีความเป็นพิษลดลงโดยเปลี่ยนโลหะในรูปของไอออนที่เข้าสู่เซลล์ให้กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (metals binding complex) ดังนั้นพืชที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วจึงไม่แสดงความเป็นพิษของตะกั่วออกมาส่งผลให้ทั้งพืชที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีการเจริญเติบโตที่ใกล้เคียงกัน (Prasad, 1999) Murillo *et al.* (1999) ศึกษาการสะสมโลหะหนักในทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักเนื่องจากการรั่วไหลของน้ำเสียจากการทำเหมืองแร่ พบว่า ทานตะวันที่ปลูกในบริเวณที่มีการปนเปื้อนโลหะสามารถเจริญเติบโตได้ดีไม่ต่างจากทานตะวันที่ปลูกในดินที่ไม่มีการปนเปื้อนโลหะ แต่ข้าวฟ่างที่

ปลูกในดินได้รับผลกระทบจากการปนเปื้อนโลหะเนื่องจากการรั่วไหลของน้ำเสียที่เกิดจากการแต่งแร่มีการเจริญเติบโตได้ดีกว่าข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปกติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากน้ำเสียจากการแต่งแร่มีธาตุอาหารที่สำคัญสำหรับการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้บางครั้งธาตุอาหารพืชก็สามารถเข้าแทนที่ตะกั่วบริเวณ uptake size ได้ เนื่องจากธาตุอาหารพืชส่วนใหญ่มีประจุบวกเช่นเดียวกับประจุของตะกั่วในสารละลายดิน (Pb^{2+}) จึงสามารถเข้าแข่งแย่งพื้นที่ในการดูดซับได้ (Greger, 1999)

จากการทดลองถึงแม้ว่าการวิเคราะห์ทางสถิติจะพบว่าพืชที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีการสะสมน้ำหนักแห้งที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่สังเกตได้ว่าพืชทั้งสองชนิดที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วจะมีปริมาณน้ำหนักแห้งสูงกว่าพืชที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วเล็กน้อย อาจเพราะตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยตะกั่วจะส่งผลในการลดปริมาณคลอโรฟิลล์และจำนวนกรานา (grana) ในคลอโรพลาสต์ นอกจากนี้ยังสามารถยับยั้งการเปลี่ยนรูปของอิทธิโอพลาสต์ไปเป็นคลอโรพลาสต์ในใบของข้าวสาลี และยังสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ซักซินเนส ในกระบวนการหายใจของพืช ส่งผลให้กระบวนการทำงานระดับเซลล์ผิดปกติการเจริญเติบโตของพืชจึงลดลง (Losch and Kohl, 1999 และ Prasad and Strzalka, 1999) Zou *et al.* (2012) ศึกษาการสะสมตะกั่วและศักยภาพในการ phytostabilization ของชนิดพืชที่เติบโตในเหมืองแร่ตะกั่วและสังกะสี พบว่าชีวมวลของพืชที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วจะมีปริมาณต่ำกว่าชีวมวลของพืชที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว นอกจากนี้ยังพบว่ารากพืชที่แข็งแรงมีความสำคัญมากสำหรับกระบวนการ phytostabilization เนื่องจากโลหะหนักมักจะมีการสะสมที่รากเป็นส่วนใหญ่ เพราะสามารถสร้างพันธะกับผนังเซลล์พืชที่สัมผัสได้ดี โอกาสในการเคลื่อนย้ายจากรากไปยังลำต้นหรือส่วนอื่น ๆ จึงลดลง (Devi and Prasad, 1999) และวัชพืชจำพวก *Cynodon dactylon*, *Sesbania rostrata* มีความเหมาะสมที่จะใช้ในกระบวนการ phytoextraction ในดินเหมืองแร่ที่มีการปนเปื้อนของตะกั่วและสังกะสีเนื่องจากมีระบบรากแบบรากฝอยทำให้รากมีโอกาสดูดซับโลหะและสามารถดูดซับโลหะหนักเหล่านั้นได้มากขึ้น (Zoo *et al.*, 2012) เช่นเดียวกับ Wei *et al.* (2009) ได้เปรียบเทียบคุณสมบัติการเป็น hyperaccumulative ของโลหะหนักจากวัชพืช 24 ชนิด พบว่า *Sorghum sudancense* ที่ปลูกในดินปนเปื้อนโลหะหนักและปลูกในดินปกติมีการสะสมน้ำหนักแห้งที่แตกต่างกัน โดยการปลูกในดินปกติมีน้ำหนักแห้งสูงกว่าปลูกในดินปนเปื้อนโลหะหนักประมาณสามเท่า โดยปกติแล้วพืชที่จัดอยู่ในกลุ่ม hyperaccumulator มักมีกลไกในการป้องกันความเป็นพิษของโลหะหนักแต่ก็มีมวลชีวภาพต่ำเนื่องจากต้องนำพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตไปใช้ในการป้องกันความเป็นพิษของโลหะหนักที่จะทำอันตรายต่อเซลล์ (Greger, 1999) ขณะที่ Ho *et al.* (2008) ได้ศึกษาการประเมินการดูด การเคลื่อนที่ และการหยุดเคลื่อนที่ของตะกั่วในต้นปอแก้วควบา พบว่าปอแก้วควบาที่ปลูกในดินที่มีการเติมสารละลายตะกั่วในปริมาณต่าง ๆ ตั้งแต่ 0-400 มิลลิกรัม/ลิตร มีการสะสมน้ำหนักแห้งที่แตกต่างกัน โดยดินที่มีการเติมสารละลายตะกั่ว 400 มิลลิกรัม/ลิตร มีการสะสมน้ำหนักแห้งสูงที่สุด ซึ่งอาจเป็นเพราะสารละลายตะกั่วที่เติมลงไปในการทดลองอยู่ในรูปของ $Pb(NO_3)_2$ ซึ่งมีองค์ประกอบของไนเตรท โดยไนเตรทเป็นรูปของไนโตรเจนที่พืชสามารถใช้เป็นธาตุอาหารสำคัญ

ในการเจริญเติบโตจึงมีผลให้พืชที่ปลูกในสารละลาย $Pb(NO_3)_2$ 400 มิลลิกรัม/ลิตร มีการเจริญเติบโตได้ดีกว่าพืชที่เจริญเติบโตในสารละลายที่มีปริมาณความเข้มข้นตะกั่วต่ำกว่า 400 มิลลิกรัม /ลิตร (Armen *et al.*, 2007) แต่ในบางครั้งปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วที่สูงเกินไปจะมีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโต การสะสมน้ำหนักแห้งของพืช (Jamali *et al.*, 2009; Nui *et al.*, 2007 และ Singh *et al.*, 2003) Panich-pat *et al.* (2010) ได้ศึกษากระบวนการ phytoextraction ของรูปธาตุในดินและน้ำที่มีการปนเปื้อนของ แคดเมียมและตะกั่ว พบว่า น้ำหนักแห้งของรูปธาตุที่ปลูกในดินปกติ ดินปนเปื้อนตะกั่ว ดินปนเปื้อน แคดเมียม และดินที่ปนเปื้อนทั้งตะกั่วและแคดเมียม มีน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ Marchiol *et al.* (2007) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยใช้ทานตะวันและข้าวฟ่างปลูกในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักจากภาคอุตสาหกรรมพบว่า ข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปกติที่ปนเปื้อนโลหะหนักมีน้ำหนักแห้ง 1.54 ดัน/เฮกแตร์ และหากมีการใช้อินทรีย์วัตถุร่วมด้วยจะสามารถเพิ่มน้ำหนักแห้งได้ถึง 16.9 ดัน/เฮกแตร์ อาจเป็นเพราะอินทรีย์วัตถุมีธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืชอีกทั้งอินทรีย์วัตถุยังสามารถสร้างพันธะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักในดินทำให้ความเป็นพิษของโลหะหนักลดลง พืชจึงสามารถเจริญเติบโตได้ดียิ่งขึ้น (Kabata-Pendias and Pandias, 1992 และ Powell and Hons, 1992)

จากน้ำหนักแห้งที่ได้กล่าวในข้างต้นสามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการทนทานต่อสารพิษของพืช ซึ่งสามารถเจริญเติบโตในสภาวะที่ไม่เหมาะสม (Nui *et al.*, 2007) ซึ่งค่า TI นี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงการอยู่รอดของพืชในสภาวะมีความเข้มข้นของโลหะสูงซึ่งอาจยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช (Xiang *et al.*, 2011) ในขณะที่จุลธาตุ เช่น สังกะสี และทองแดง มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมในเซลล์ แต่ปริมาณตะกั่วในดินจะมีผลทำให้พืชมีการเจริญเติบโตได้ช้าลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความเป็นพิษของตะกั่วที่มีต่อเซลล์พืช โดยตะกั่วในรูปของไอออนจะมีความเป็นพิษสูงกว่าตะกั่วในรูปสารเชิงซ้อนซึ่งมีความสามารถในการทำลาย โปรตีน ดีเอ็นเอ ลดระดับกลูตาไธโอน และยับยั้งการสร้าง ATP ในเซลล์พืช (Devi and Prasad, 1999; Kamal *et al.*, 2004; Vamerali *et al.*, 2010 และ Xiang *et al.*, 2011) โดยพืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการสะสมโลหะและมีความทนทานต่อโลหะหนักที่แตกต่างกัน โดยพบว่าพืชในตระกูล *Brassica spp.* มีความสามารถในการสะสมและสามารถเจริญเติบโตในสภาพพื้นที่ที่มีโลหะหนักปนเปื้อนได้ดี (Marchiol *et al.*, 2004) จากการศึกษาความสามารถในการทนทานต่อสารพิษของทานตะวันและข้าวฟ่างซึ่งปลูกในดินที่มีความเข้มข้นตะกั่วสูง (1,450 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) พบว่าทานตะวันมีค่า TI 0.74 ส่วนที่ข้าวฟ่างมี TI 0.84 จากข้อมูลที่ได้นี้บ่งบอกถึงการเจริญเติบโตของทานตะวันและข้าวฟ่างในดินปนเปื้อนตะกั่วมีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่ำกว่าทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว สอดคล้องกับงานทดลองของ Allica *et al.* (2008) ศึกษาการประเมินศักยภาพกระบวนการ phytoextraction ของพืชที่มีชีวมวลสูง พบว่าข้าวฟ่างสายพันธุ์ I30 และทานตะวันพันธุ์ Sombro ซึ่งปลูกในสารละลายที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 500 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่า TI เท่ากับ 0.81 และ 0.71 ตามลำดับ เป็นไปในทางเดียวกับ Marchiol *et al.* (2004) ซึ่งทำการศึกษากระบวนการ phytoextraction

โลหะหนักของดิน canola และ radish ที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหลายชนิด โดยค่า TI ของดิน canola และ radish มีค่าประมาณ 0.67 และ 0.76 ตามลำดับ

2. เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในทานตะวันและข้าวฟ่าง

จากการศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักในส่วนต่าง ๆ ของพืชทั่วไปพบว่า ความเข้มข้นของโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณราก (Yoon *et al.*, 2006; Marchiol *et al.*, 2007) และมีการเคลื่อนย้ายขึ้นมาสะสมในส่วนต่าง ๆ ของพืชได้ในปริมาณไม่มากนัก เนื่องจากโลหะหนักซึ่งส่วนใหญ่มีประจุบวกสามารถสร้างพันธะกับผนังเซลล์ของพืชซึ่งมีโครงสร้างผนังเซลล์เป็นประจุลบได้ดี อีกทั้งการเคลื่อนที่ของโลหะหนักผ่านระบบท่อลำเลียงในพืชเป็นไปได้ค่อนข้างยากเนื่องจากระบบท่อลำเลียงน้ำและอาหารของพืชมีเอนโดเดอร์มิสและแคพพารีเยนสดีปกกันอยู่ ทำให้การเคลื่อนที่ผ่านขึ้นไปสู่ส่วนเหนือดินเกิดขึ้นได้ยาก (Poschenrieder and Barcelo, 1999) โดยจากการทดลองพบว่าทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน มีการสะสมตะกั่วในรากมากกว่าส่วนเหนือดินถึง 7.8 เท่า ส่วนข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน มีการสะสมตะกั่วในรากมากกว่าส่วนเหนือดินถึง 6.5 เท่า Greger (1999) รายงานว่า 75-90 เปอร์เซ็นต์ โลหะหนักจะสะสมอยู่ในรากเนื่องจากเกิดกลไกสามกลไกหลักคือ กลไกการดูดซับโลหะหนักกับเซลล์โลส และเฮมิเซลล์โลสบริเวณผนังเซลล์ กลไกการเคลื่อนที่ผ่าน อะพوپลาสต์ (apoplast) และสร้างพันธะกับกรดอินทรีย์ (organic acid) บริเวณช่องว่างในอะพوپลาสต์ และกลไกการสร้างพันธะกับสารกิลเลตินเซลล์เพื่อส่งผ่านโลหะหนักไปยังแวกิโอลเป็นการลดความเป็นพิษของโลหะหนักในเซลล์ Panich-pat *et al.* (2004) และ Panich-pat and Srinives (2009) ได้ศึกษาการบำบัดตะกั่วจากดินที่มีการปนเปื้อนโดยใช้รูปฤาษีและศึกษาการสะสมตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของข้าว พบว่ารูปฤาษีและข้าวมีความสามารถในการสะสมตะกั่วในรากได้ในความเข้มข้นที่สูง และการสะสมตะกั่วในรากจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของตะกั่วในดิน Greger (1999) รายงานว่าการดูดซับโลหะจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นโลหะในตัวกลางที่ดูดซับ (external medium) จากการศึกษาของ Panich-pat and Srinives (2009) รายงานว่าที่ความเข้มข้น 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร ข้าวสามารถดูดซับตะกั่วไว้ในรากได้ถึง 400 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เคลื่อนย้ายมาสะสมในเปลือกได้เพียง 0.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และไม่พบการสะสมตะกั่วในข้าวขาว (white rice) ซึ่งปกติความเข้มข้นของตะกั่วในดิน 100-500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม พืชอาจมีการแสดงความเป็นพิษของตะกั่วออกมา (Kabata-Pendias and Pendias, 1992) จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของทานตะวันและข้าวฟ่าง พบว่า ทานตะวันและข้าวฟ่างมีการสะสมตะกั่วในส่วนรากสูงที่สุด รองลงมาคือส่วนลำต้นและใบ เปลือก ดอก และเมล็ด ตามลำดับ สอดคล้องกับ Jarvit *et al.* (1976) และ Greger (1999) รายงานว่า ตะกั่วจะมีการสะสมสูงที่สุดในรากฝอย รองลงมาคือรากแก้ว ลำต้น และใบ ตามลำดับ แตกต่างจาก Murillo *et al.* (1999) ซึ่งทำการศึกษาการสะสมโลหะหนักในทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก เนื่องจากการรั่วไหลของน้ำเสียจากการทำเหมืองแร่พบว่า ในทานตะวันจะมีความเข้มข้นของตะกั่วในใบสูงที่สุด รองลงมาคือ ราก ก้านใบ ลำต้น

และเมล็ด ตามลำดับ ส่วนในข้าวฟ่างจะมีความเข้มข้นของตะกั่วสูงสุดในราก รองลงมาคือ ใบ และลำต้น Zhuang *et al.* (2009) พบว่า หากมีการใช้ EDTA ร่วมด้วยจะสามารถช่วยเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วในข้าวฟ่างได้เป็นสองเท่า สอดคล้องกับการศึกษาของ Sinegani and Khalilikhah (2008) พบว่าความเข้มข้นของตะกั่วในรากพืชมีความเข้มข้นสูงกว่าในส่วนอื่น ๆ ซึ่งโดยทั่วไปความเข้มข้นของตะกั่วในเนื้อเยื่อพืชจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่ม EDTA ลงไปในการทดลอง นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าดินจากบ้านคลิตี้ซึ่งเป็นตัวแทนของดินปนเปื้อนตะกั่วและดินจากสถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน ซึ่งเป็นตัวแทนของดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว มีปริมาณอินทรียวัตถุ (organic matter) และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ที่แตกต่างกัน โดยดินจากบ้านคลิตี้มีปริมาณอินทรียวัตถุและความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงถึง 6.62 และ 24.46 ขณะที่ดินจากสถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน มีค่าเพียง 1.05 และ 5.21 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าดินจากบ้านคลิตี้มีปริมาณอินทรียวัตถุและค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอยู่ในเกณฑ์สูงขณะที่ดินจากสถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน มีค่าอยู่ในระดับต่ำ (กองสำรวจดิน, 2523) Greger (1999); Lasat (2000) และ Manara (2012) รายงานว่าในดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุสูง โลหะหนักที่อยู่ในรูปของไอออนซึ่งส่วนใหญ่จะมีประจุบวกจะสามารถเข้ายึดเกาะกับประจุลบของอินทรียวัตถุแล้วสร้างพันธะที่มีความเสถียรสูง เป็นสาเหตุให้ธาตุโลหะเหล่านั้นถูกตรึงในดิน และพืชที่เจริญเติบโตในบริเวณเหล่านี้จะสามารถดูดซับโลหะในดินได้ลดลง

จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของตะกั่วในทานตะวันและข้าวฟ่างที่ระยะต่างคือ 35, 70 และ 105 วัน พบว่าทั้งทานตะวันและข้าวฟ่างจะมีความเข้มข้นของตะกั่วสูงสุดที่ระยะ 105 วัน และความเข้มข้นของตะกั่วจะมีค่าต่ำสุดที่ระยะ 35 วัน สอดคล้องกับการศึกษาของ Huang and Cunningham (1996) ได้ศึกษากระบวนการเปลี่ยนแปลงและการเคลื่อนย้ายตะกั่วในพืชพบว่า ข้าวโพดซึ่งปลูกในสารละลายตะกั่วเข้มข้น 20 ไมโครโมล จะมีการสะสมตะกั่วในเนื้อเยื่อรากและเนื้อเยื่อส่วนยอด (Shoot) เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกับสารละลายตะกั่วมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาของ Adesodun *et al.* (2010) ได้ศึกษาศักยภาพของทานตะวันสองสายพันธุ์คือ *Tithonia diversifolia* และ *Helianthus annuus* เพื่อใช้ในกระบวนการ phytoremediation ในดินที่มีการปนเปื้อนสังกะสีและตะกั่ว พบว่าที่ระยะ 4 สัปดาห์ หลังปลูกทานตะวันทั้งสองสายพันธุ์มีการสะสมตะกั่วในรากสูงกว่าที่ระยะ 6 และ 8 สัปดาห์ หลังปลูก โดยที่ระยะ 4 สัปดาห์ มีการสะสมตะกั่วในรากของทานตะวันทั้งสองสายพันธุ์สูงถึง 99.4 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และ 100.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ Adesodun *et al.* (2010); Blaylock *et al.* (1997) และ Huang and Cunningham (1996) พบว่าพืชสามารถกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินได้ประมาณ 180-530 กิโลกรัม/เฮกแตร์/ปี และในระยะเวลา 10 ปี สามารถกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินได้ถึง 2,500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และอาจกล่าวได้ว่าทานตะวันเป็นพืชที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองซึ่งพบว่าทานตะวันสามารถดูดซับตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินเข้ามาสะสมในส่วนต่าง ๆ ได้สูงถึง 150.9 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนข้าวฟ่างสามารถดูดซับตะกั่วได้ถึง 125.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

จากการศึกษาของ Murillo *et al.* (1999) พบว่าทานตะวันที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก จะมีปริมาณตะกั่วสะสมในรากมากกว่าทานตะวันที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนโลหะประมาณ 8 เท่า สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยพบว่าทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีปริมาณตะกั่วสะสมในส่วนต่าง ๆ ของต้นสูงกว่าทานตะวันที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วประมาณ 15 เท่า ส่วนข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีปริมาณตะกั่วสะสมในส่วนต่าง ๆ ของต้นสูงกว่าข้าวฟ่างที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว 12 เท่า สอดคล้องกับ Greger (1999) Lasat (2000) และ Manara (2012) ซึ่งรายงานว่าพืชจะมีการดูดซับโลหะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโลหะในดินเพิ่มขึ้น แต่การดูดซับจะมีค่าลดลงอย่างมากหาก pH ของดินเพิ่มสูงขึ้น โดยโลหะจะสามารถตกตะกอนร่วมกับฟอสเฟต หรือคาร์บอเนต ขณะที่ Chakroun *et al.* (2010) ศึกษาการเคลื่อนย้ายและการสะสมตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม และทองแดง ในพื้นที่เจริญเติบโตในเมืองแร้ พบว่า ถั่วปากอ้าสามารถสะสมตะกั่วได้สูงสุด 508 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนข้าวบาร์เล่ย์สามารถสะสมตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ได้ 237 มิลลิกรัม/กิโลกรัม Nui *et al.* (2007) ศึกษากระบวนการ phytoextraction แคดเมียมและตะกั่วโดยทานตะวัน ละหุ่ง ถั่วอัลฟัลฟา และผักกาดเขียวปลี ในสภาพไฮโดรโปนิกส์ พบว่าทานตะวันสามารถสะสมแคดเมียมและตะกั่วได้ดีกว่าพืชชนิดอื่น ๆ สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ซึ่งพบว่าทานตะวันสามารถดูดซับตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินได้ดีกว่าข้าวฟ่าง Greger (1999) อธิบายถึงสาเหตุของความแตกต่างของการดูดซับโลหะของพืชสองกลุ่มคือ กลุ่มพืชใบเลี้ยงเดี่ยว และกลุ่มพืชใบเลี้ยงคู่ไว้ว่า พืชใบเลี้ยงคู่มีประจุลบบริเวณโครงสร้างของผนังเซลล์มากกว่าพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ทำให้พืชใบเลี้ยงคู่มีโอกาสนในการดูดซับโลหะหนัก (โลหะหนักส่วนใหญ่มีประจุบวก เช่น Pb^{2+}) มากกว่าพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ดังนั้นทานตะวันซึ่งเป็นพืชใบเลี้ยงคู่จึงมีโอกาสนในการดูดซับตะกั่วมากกว่าข้าวฟ่างซึ่งเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว นอกจากนี้ Sekara *et al.* (2005) ได้ศึกษาการสะสมแคดเมียมและตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของพืชทั้งหมด 9 ชนิด พบว่า บีทรูท พักทอง ชิโครี ถั่วแขก ผักกาดขาว ถั่วอัลฟัลฟา และแครอท มีการสะสมตะกั่วในใบสูงกว่าในส่วนอื่น ๆ ส่วนข้าวโพดและข้าวบาร์เล่ย์ พบว่ามีการสะสมตะกั่วในรากสูงสุด ในการสะสมและการกระจายของโลหะนั้นมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติของดิน โดยเฉพาะ pH ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน ปริมาณแร่ดินเหนียว (clay mineral) ความเข้มข้นของโลหะในดิน สภาพการละลายได้ของโลหะหนัก และชนิดพืช ซึ่งเป็นตัวควบคุมการละลายและการตกตะกอนของโลหะในดิน (Bose and Bhattacharyya, 2008; Chandra *et al.*, 2009; Greger, 1999 และ Gupta and Sinha, 2007)

ด้านการสะสมตะกั่วในลำต้นและใบของทานตะวันและข้าวฟ่างนั้นพบว่า ปริมาณตะกั่วในลำต้นและใบของทานตะวันและข้าวฟ่างทุกระยะการเก็บเกี่ยวมีความเข้มข้นตะกั่วเฉลี่ยประมาณ 13 มิลลิกรัม/กิโลกรัม Levy *et al.* (1999) รายงานว่าความเข้มข้นปกติของตะกั่วในพืชมีค่าอยู่ในช่วง 0.5-10 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และตะกั่วจะแสดงความเป็นพิษในพืชในช่วงความเข้มข้นประมาณ 30-300 มิลลิกรัม/กิโลกรัม Adesodun *et al.* (2010) รายงานว่าทานตะวันมีการสะสมตะกั่วในใบสูงกว่าในลำต้น โดยพบว่าทานตะวันที่ระยะ 4 สัปดาห์หลังปลูกมีความเข้มข้นตะกั่วสูงกว่าทานตะวันที่ระยะ 6 และ 8 สัปดาห์หลังปลูก

สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้โดยพบว่า ทานตะวันที่ระยะเก็บเกี่ยว 35 วัน มีความเข้มข้นตะกั่วสะสมในลำต้นและใบสูงที่สุด (17.4 ± 3.4 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) Panich-Pat *et al.* (2005) พบว่าตะกั่วมีการสะสมในใบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแควิวโอล โดยมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร แต่ไม่พบการสะสมของตะกั่วในนิวเคลียสและไมโทคอนเดรีย เนื่องจากโลหะหนักเมื่อเข้าสู่เซลล์พืช ตัวเซลล์พืชจะสังเคราะห์ phytochelatins (PCs) จากกลูตาไรโอนภายในเซลล์เพื่อจับกับไอออนของโลหะหนัก ส่งผลให้โลหะหนักมีความเป็นพิษต่อเซลล์พืชลดลง จากนั้น PCs จะเป็นตัวกลางในการส่งโลหะหนักเข้าสู่แควิวโอลต่อไป (Prasad, 1999) Panich-pat and Srinives (2009) พบว่า ข้าวที่เจริญเติบโตในดินที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถเคลื่อนย้ายตะกั่วจากดินมาสะสมในลำต้นและใบได้ถึง 127 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ขณะที่การทดลองนี้ทำการปลูกทานตะวันและข้าวฟ่างในดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว 1,450 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งตะกั่วมีการเคลื่อนย้ายขึ้นมาสะสมในลำต้นและใบของทานตะวันได้สูงสุด 17.4 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนในข้าวฟ่างมีการสะสมตะกั่วในลำต้นและใบได้สูงสุด 14.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม Marchiol *et al.* (2007) พบว่าตะกั่วมีการเคลื่อนย้ายจากรากขึ้นมาสะสมในส่วนเหนือดินได้น้อยมาก โดยทานตะวันและข้าวฟ่างสามารถเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากขึ้นมาสะสมในส่วนเหนือดินได้เพียง 4.5 และ 5.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ในส่วนของการสะสมตะกั่วในเมล็ดของทานตะวันและข้าวฟ่าง พืชทั้งสองชนิดมีการสะสมตะกั่วเกินค่ามาตรฐานที่จะนำมาใช้เป็นอาหารมนุษย์ ซึ่งความเข้มข้นของตะกั่วในเมล็ดธัญพืชสำหรับใช้บริโภคเป็นอาหารมนุษย์กำหนดไว้ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) (SEPA, 2005) ส่วนค่าที่ยอมรับได้สำหรับใช้เป็นอาหารสำหรับเลี้ยงสัตว์คือไม่เกิน 30 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง) (Chaney, 1989) โดยจากการทดลองพบว่าทานตะวันที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วมีการสะสมตะกั่วในเมล็ดสูงถึง 0.72 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนข้าวฟ่างมีการสะสมตะกั่วสูงถึง 0.65 มิลลิกรัม/กิโลกรัม สอดคล้องกับ Wang *et al.* (2011) พบว่าข้าวสาลีที่ปลูกในดินที่มีความเข้มข้นตะกั่วสูง (1547.7 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) จะมีความเข้มข้นตะกั่วสะสมในเมล็ดได้ถึง 0.56 มิลลิกรัม/กิโลกรัม Jamali *et al.* 2007 ศึกษาการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักจากดินและตะกอนน้ำโสโครกสู่ข้าวฟ่าง พบว่า ข้าวฟ่างที่เจริญเติบโตในดินที่มีการใช้กากตะกอนน้ำโสโครกในการปรับปรุงดินซึ่งมีตะกั่วปนเปื้อนอยู่ 235 มิลลิกรัม/กิโลกรัม มีความเข้มข้นตะกั่วในเมล็ดสูงถึง 3.78 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งถือว่าเกินเกณฑ์มาตรฐานในการใช้บริโภคเป็นอาหารมนุษย์ (0.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) (SEPA, 2005) เช่นเดียวกับ Sekara *et al.* (2005) รายงานว่าข้าวบาร์เล่ย์ที่ปลูกในดินที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 22.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม สามารถเคลื่อนย้ายตะกั่วมาสะสมในรากได้ 13.1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และเคลื่อนย้ายตะกั่วมาสะสมในเมล็ดได้ 1.8 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายตะกั่ว

การเคลื่อนย้ายตะกั่วจากดินเข้าสู่พืช (Bioconcentration factor, BCF) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการศึกษาการสะสมและการเคลื่อนย้ายของโลหะหนัก (Yoon *et al.*, 2006) โดยชนิดพืชที่สมควรนำมาพิจารณาเพื่อใช้ในการบำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนโลหะควรมีค่า $BCF > 1$ (ความเข้มข้นของโลหะในพืช/ความเข้มข้นของโลหะในดิน) (Bose and Bhattacharyya, 2008) Baker (1981) และ Greger (1999) แบ่งประสิทธิภาพของพืชในการดูดซับโลหะหนักออกเป็น 3 กลุ่ม คือ (1) Excluders กลุ่มนี้มีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักเข้ามาสะสมในตัวพืชได้ต่ำ เนื่องจากในสภาพที่ดินมีความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำพืชจะมีกลไกในการป้องกันไม่ให้โลหะเข้ามาสะสมในตัวพืชได้ แต่เมื่อโลหะหนักในดินมีการปลดปล่อยออกมาในรูปของไอออนเพิ่มขึ้น กลไกในการป้องกันการสะสมโลหะหนักจะหายไปทำให้โลหะหนักสามารถเข้ามาสะสมในเซลล์พืชได้สูงขึ้น (2) Accumulators กลุ่มนี้พืชจะมีความสามารถในการสะสมโลหะหนักได้สูง ถึงแม้ว่าปริมาณโลหะหนักในสารละลายดินจะมีปริมาณต่ำก็ตาม พืชก็สามารถดูดซับโลหะหนักเข้ามาสะสมในเซลล์ได้สูงกว่าปริมาณที่มีอยู่ในสารละลายดิน (3) Indicator plants พืชกลุ่มนี้จะสะสมโลหะหนักได้มากก็ต่อเมื่อปริมาณโลหะหนักในสารละลายดินเพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่า ทานตะวันและข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน มีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายตะกั่วเข้ามาสะสมในพืชสูงกว่าที่ระยะเก็บเกี่ยวอื่น ๆ อาจเป็นเพราะเนื่องจากที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน พืชมีระยะเวลาในการสัมผัสกับตะกั่วในดินได้ยาวนานกว่าที่ระยะเก็บเกี่ยวอื่น ๆ ทำให้ตะกั่วสามารถเคลื่อนที่เข้ามาสะสมได้มากขึ้น (Huand and Cunningham, 1996) Nui *et al.* (2007) รายงานว่า BCF จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วลงในชุดการทดลอง โดยทานตะวันมีความสามารถในการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากสารละลายที่ใช้ทดลองมาสะสมในส่วนต่าง ๆ ได้สูงกว่า ละหุ่ง ถั่วอัลฟัลฟา และผักกาดเขียวปลี สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ซึ่งพบว่าทานตะวันมีความสามารถเคลื่อนย้ายตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินเข้ามาสะสมในส่วนต่าง ๆ ได้สูงกว่าข้าวฟ่าง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากทานตะวันเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ทำให้มีประจุลบบริเวณ โครงสร้างของผนังเซลล์สูงกว่าข้าวฟ่างซึ่งเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ตะกั่วจึงสามารถจับกับรากของทานตะวันได้ดีกว่าข้าวฟ่าง (Devi and Prasad, 1999 และ Greger, 1999) จากการศึกษาของ Wang *et al.* (2011) สรุปได้ว่าค่า BCF ที่สูงนั้นส่วนหนึ่งมาจากความเข้มข้นของโลหะในดินที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีส่วนเกี่ยวข้องกับสมบัติของดินและชนิดพืช Huang and Cunningham (1996) รายงานว่า ข้าวโพดสามารถสะสมตะกั่วในส่วนยอดได้ดีกว่าหญ้า ragweed และหากข้าวโพดสัมผัสกับตะกั่วในสารละลายนานขึ้นจะสามารถดูดซับตะกั่วในสารละลายได้มากขึ้นด้วย เมื่อทดสอบในสภาพแปลงทดลองจริงพบว่าข้าวโพดสามารถเจริญเติบโตในดินที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 2,500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ได้ดี โดยมีความเข้มข้นตะกั่วในส่วนเหนือดินและในส่วนรากได้ถึง 225 และ 1,250 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ Zou *et al.* (2012) พบว่า *Athyrium wardii* ซึ่งเป็นเฟิร์นชนิดหนึ่งมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วจากดินเข้ามาสะสมในส่วนต่าง ๆ ของต้นได้เป็นอย่างดี โดยพบว่าในช่วงแรกของการเจริญเติบโตมีค่า BCF สูงกว่าในช่วงระยะอื่น ๆ ของการเจริญเติบโต ($BCF=50.2$) ซึ่ง

ความเข้มข้นตะกั่วในช่วงแรกของการเจริญเติบโตและช่วงสุดท้ายของการเจริญเติบโตมีค่าสูงถึง 15,542 และ 10,720 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าการเจริญเติบโตในดินปกติถึง 426 และ 455 เท่า ตามลำดับ แตกต่างจากผลการทดลองที่ได้ซึ่งพบว่าระยะที่พืชทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินมาสะสมในส่วนต่าง ๆ คือ ที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน หรืออาจกล่าวได้ว่าระยะนี้คือช่วงสุดท้ายของการเจริญเติบโต จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการสะสมตะกั่วในพืชทั้งสองชนิดที่ได้จากการทดลองจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อพืชมีอายุการเจริญเติบโตมากขึ้น Chandra *et al.* (2009) ศึกษาการสะสมและการกระจายของโลหะในข้าวสาลีและผักกาดเขียวปลีที่ได้รับน้ำเสียจากโรงงานต้มสุราและโรงงานฟอกหนัง พบว่าในข้าวสาลีมีค่า $BCF < 1$ ส่วนผักกาดเขียวปลีมีค่า $BCF > 1$ จึงกล่าวได้ว่าผักกาดเขียวปลีมีศักยภาพในการดูดซับตะกั่วได้ดีจึงควรพิจารณาเป็น hyper-accumulator plant เมื่อพิจารณาค่า BCF ที่ได้จากการทดลอง พบว่าพืชทั้งสองชนิดมีค่า BCF ที่น้อยกว่า 1 อาจกล่าวได้ว่าพืชทั้งสองชนิดนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการบำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนตะกั่วในความเข้มข้นสูง Panich-pat and Srinives (2009) พบว่าข้าวที่ปลูกในดินที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่า BCF สูงถึง 24.9 ซึ่งมากกว่าข้าวที่ปลูกในดินที่มีความเข้มข้นตะกั่ว 0 และ 1,500 มิลลิกรัม/ลิตร

การเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากสู่ส่วนเหนือดิน (Translocation factor, TF) ค่า TF มีความสำคัญสำหรับกระบวนการ phytoextraction เนื่องจากเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายโลหะขึ้นมายังส่วนที่เก็บเกี่ยวได้สะดวก (shoot) เพราะการเก็บเกี่ยวพืชทั้งต้นทำได้ยาก ดังนั้นการเก็บเกี่ยวเฉพาะส่วนจึงมีความจำเป็นเพื่อให้การทำงานสามารถทำได้สะดวกยิ่งขึ้น Kabata – Pendias and Pendias (1992) รายงานว่าปกติพืชที่มีการสะสมตะกั่วมักพบว่า 3 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นตะกั่วในรากสามารถเคลื่อนย้ายไปยังส่วนเหนือดินได้ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วตะกั่วจะสะสมในรากและมีปริมาณน้อยมากที่เคลื่อนที่ไปสะสมในส่วนเหนือดิน สอดคล้องกับ Marchiol *et al.* (2007) พบว่าต้น radish ที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหลายชนิดมีค่า TF เท่ากับ 0.04 ในขณะที่ต้น canola ซึ่งปลูกในดินชนิดเดียวกันมีค่า TF เพียง 0.01 เท่านั้น สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ โดยพบว่าทานตะวันและข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 35 วัน มีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากขึ้นมาสะสมในส่วนเหนือดินได้สูงสุด 0.21 สำหรับทานตะวัน ส่วนในข้าวฟ่างมีค่า 0.17 จากการศึกษาของ Huang and Cunningham (1996) พบว่าตะกั่วสามารถลดความเข้มข้นของแคลเซียมในส่วนยอดของข้าวโพดที่ปลูกในสารละลายที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ และตะกั่วยังสามารถลดความเข้มข้นของแคลเซียมในรากข้าวโพดลงได้ 88 เปอร์เซ็นต์ จึงกล่าวได้ว่าตะกั่วสามารถยับยั้งการเคลื่อนย้ายแคลเซียมไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืชได้ สอดคล้องกับ Kabata – Pendias and Pendias (1992) รายงานว่า ตะกั่วสามารถเข้าแทนที่โพแทสเซียมและแคลเซียมในตำแหน่งการดูดซับของธาตุทั้งสองชนิดนี้ได้ ดังนั้นตะกั่วอาจเข้าแก่งแย่งการดูดซับโดยรากพืชกับแคลเซียม มีผลให้ปริมาณแคลเซียมที่พืชนำไปใช้ในส่วนต่าง ๆ มีค่าลดลงตามไปด้วย Adesodun *et al.* (2010) รายงานว่าทานตะวันหลังปลูกที่ระยะ 8 สัปดาห์ พบว่ามีค่า TF สูงกว่าทานตะวันหลังปลูกที่ระยะ 4 และ 6 สัปดาห์ และค่า TF ที่ได้จากทุกระยะของการปลูกพบว่ามีค่าสูงกว่า 1 จึงอาจกล่าวได้ว่าทานตะวันมีความสามารถ

ในการเคลื่อนย้ายตะกั่วมาสะสมในส่วนเหนือดินได้ดี แตกต่างจากผลการทดลองที่ได้ ซึ่งพบว่าทานตะวัน และข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 35 วันมีค่า TF สูงสุด อาจเป็นผลมาจากที่ระยะเก็บเกี่ยว 35 วัน ตะกั่วจะสามารถเคลื่อนย้ายผ่าน xylem และ phloem ได้ดีกว่าที่ระยะเก็บเกี่ยว 70 และ 105 วัน เพราะในระยะที่พืชเป็นต้นอ่อน เซลล์ในชั้นเอนโดเดอร์มิส และแคปพาเรียนสตีปยังพัฒนาได้ไม่สมบูรณ์ ทำให้โลหะหนักสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นเซลล์เหล่านี้ได้ง่ายกว่าที่ระยะ 70 และ 105 วัน ซึ่งเซลล์จะมีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่า (Greger, 1999) และค่า TF ที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่า 1 ทุกระยะเก็บเกี่ยว ซึ่งเป็นผลมาจากตะกั่วจะสร้างพันธะกับผนังเซลล์ของราก ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนย้ายขึ้นมายังส่วนเหนือดิน หรืออาจเคลื่อนย้ายขึ้นมาได้ในความเข้มข้นต่ำ (Devi and Prasad, 1999) จากการศึกษาของ Ho *et al.* (2008) พบว่าการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากสู่ส่วนเหนือดินของปอแก้วมีความค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งอาจเป็นเพราะพืชมีการปกป้องตัวเองจากความเป็นพิษของตะกั่วที่มีความเข้มข้นสูง Mohebbi *et al.* (2012) พบว่าถั่วอัลฟัลฟามีความสามารถในการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากมาสะสมในส่วนเหนือดินได้สูงกว่าข้าวโพดและทานตะวัน Sinegani and Khalilikhah (2008) รายงานว่าค่า TF ของการปลูกทานตะวันในดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่วจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระดับ EDTA แต่จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำสกัดจากมูลแกะลงในชุดทดลอง โดยค่า TF จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ EDTA 5 กรัม/กิโลกรัม

การดูดซับตะกั่วโดยพืช (Uptake by plant, UP) ค่า UP เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพที่แท้จริงของพืชหนึ่งต้นที่จะสามารถดูดซึมโลหะหนักเข้ามาสะสมในพืช โดยคำนวณเป็นค่าที่แท้จริงที่พืชจะสามารถดูดซับได้ (mg Pb) (จำนวนโลหะที่ดูดซับโดยพืชหนึ่งต้น $\times$ น้ำหนักแห้งของพืชต้นนั้น) จากการทดลองพบว่า ข้าวฟ่างที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน มีการดูดซับตะกั่วที่แท้จริงได้ถึง 18.50 มิลลิกรัม/ต้น ขณะที่ทานตะวันที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน สามารถดูดซับตะกั่วได้เพียง 11.30 มิลลิกรัม/ต้น โดยจะสังเกตได้ว่าเมื่อนำค่านอกออกมาในหน่วยของ มิลลิกรัม/กิโลกรัม ทานตะวันที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน กลับมีค่าการสะสมตะกั่วในส่วนต่าง ๆ สูงกว่าข้าวฟ่าง ซึ่งเป็นเพราะน้ำหนักแห้งที่แท้จริงของข้าวฟ่างสูงกว่าทานตะวัน การคำนวณออกมาในรูปของการสะสมที่แท้จริงต่อพืชหนึ่งต้นของข้าวฟ่างจึงสูงกว่าทานตะวัน Greger (1999) อธิบายถึงความสำคัญของน้ำหนักแห้งพืชที่ใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักในดินไว้ว่า พืชที่มีน้ำหนักแห้งมากแสดงถึงการผลิตมวลชีวภาพได้มาก พืชที่มีมวลชีวภาพมากแสดงถึงการเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก ย่อมมีความสามารถในการดูดซับโลหะที่ปนเปื้อนในดินได้มากด้วย อีกนัยหนึ่ง การที่พืชมีมวลชีวภาพมากจะเป็นการเจือจางความเป็นพิษของโลหะภายในเซลล์พืชลงไปด้วย ทำให้พืชมีโอกาสแสดงความเป็นพิษ (phytotoxicity) ของโลหะหนักลดลง (Marschner, 1995)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการเจริญเติบโต ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่ว และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายตะกั่วสู่พืชของทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่วจากบ้านคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเจริญเติบโตของทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่วนั้นมีการเจริญเติบโตใกล้เคียงกัน โดยความสูงและน้ำหนักแห้งของทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในดินปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตะกั่วมีค่าไม่แตกต่างกัน
2. ความเข้มข้นของตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของทานตะวันและข้าวฟ่างทั้งประเภทที่ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่วและปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วพบว่า ตะกั่วจะมีการสะสมในรากสูงที่สุด รองลงมาคือ ส่วนลำต้นและใบ ส่วนเปลือก ส่วนดอก และส่วนเมล็ด ตามลำดับ
3. เมื่อเปรียบเทียบการสะสมตะกั่วระหว่างทานตะวันและข้าวฟ่างจะเห็นว่าทานตะวันมีการสะสมตะกั่วโดยรวมสูงกว่าข้าวฟ่าง โดยที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน จะมีการสะสมตะกั่วได้สูงที่สุด
4. ปริมาณการสะสมตะกั่วในเมล็ดของทานตะวันและข้าวฟ่าง ในดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่ว ทานตะวันและข้าวฟ่างมีปริมาณตะกั่วในเมล็ดสูงเกินค่ามาตรฐานเพื่อการบริโภคเป็นอาหารมนุษย์ (0.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) แต่ไม่เกินค่ามาตรฐานของการใช้เพื่อเป็นอาหารสัตว์ (30 มิลลิกรัม/กิโลกรัม)
5. ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายตะกั่ว ในการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากดินเข้าสู่พืช ทานตะวันที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน จะมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากดินเข้าสู่พืชมากกว่าที่ระยะเก็บเกี่ยว 35 วัน และ 70 วัน เช่นเดียวกับข้าวฟ่างที่มีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายตะกั่วที่ระยะเก็บเกี่ยว 105 วัน สูงกว่าที่ระยะเก็บเกี่ยวอื่น ๆ ส่วนการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากสู่ส่วนเหนือดินนั้น ทานตะวันที่ระยะ 35 วัน มีการเคลื่อนย้ายตะกั่วจากรากมาสู่ส่วนเหนือดินได้สูงกว่าระยะ 70 วัน และ 105 วัน

ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองที่ได้ ปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วในเมล็ดมีค่าสูงเกินมาตรฐานเพื่อการใช้บริโภคเป็นอาหารมนุษย์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาแนวทางในการนำผลผลิตที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ซึ่งจากการค้นคว้าจากเอกสารต่าง ๆ พบว่ามีแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายวิธีดังนี้

1. การนำต้นพืชหลังจากปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนตะกั่วไปเผา เป็นวิธีที่ใช้ในการกำจัดเศษเหลือจากพืชภายหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งทำกันอย่างแพร่หลาย ถ้าที่เหลือจากการเผาอาจนำไปใช้เพื่อการถมพื้นที่เพื่อใช้ในการก่อสร้างอาคารบ้านเรือนต่อไป หรือนำไปใช้ผสมเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างต่อไป (Brooks *et al.*, 1998; Vamerali *et al.*, 2010)

2. การนำไปใช้เลี้ยงสัตว์ จากผลการทดลองความเข้มข้นของตะกั่วใน ลำต้นและใบ ดอก เปลือก และเมล็ด มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่จะนำไปใช้เลี้ยงสัตว์ได้ (30 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) จึงอาจนำไปประยุกต์หรือผลิตเป็นอาหารสัตว์ในรูปแบบต่าง ๆ ได้ โดยเมล็ดอาจนำไปผสมกับวัตถุดิบอื่น ๆ และส่วนลำต้นและใบ อาจใช้เป็นอาหารสัตว์ได้โดยตรง (Chaney, 1989)

3. การนำไปใช้เพื่อผลิตเป็นเอทานอล ทานตะวันและข้าวฟ่างที่ใช้ทดลองมีประสิทธิภาพในการใช้ผลิตเป็นเอทานอลได้ดี โดยเฉพาะข้าวฟ่างพันธุ์ KCU 40 ที่ใช้ในการทดลองเป็นพันธุ์ข้าวฟ่างหวาน (Laopaiboon *et al.*, 2009) มีปริมาณน้ำตาลในลำต้นสูงกว่าข้าวฟ่างพันธุ์ปกติทั่วไป จึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้ในการผลิตเอทานอล อีกทั้งข้าวฟ่างหวานมีข้อดีกว่าการใช้ฮ่อยหรือมันสำปะหลัง เพราะข้าวฟ่างหวานใช้เวลาเจริญเติบโตจนถึงเก็บเกี่ยวประมาณสามเดือนครึ่งถึงสี่เดือนเท่านั้น ในขณะที่ฮ่อยและมันสำปะหลังต้องใช้เวลาถึงหนึ่งปีจึงเก็บเกี่ยวได้ โดยส่วนที่นำไปใช้ในการผลิตนั้นจะใช้ส่วนลำต้นและใบของข้าวฟ่าง เนื่องจากมีปริมาณน้ำตาลสูงกว่าส่วนอื่น ๆ (Prasad *et al.*, 2007)

4. การนำมาสกัดเป็นน้ำมัน จากการสืบค้นงานวิจัยพบว่า หากมีการนำเมล็ดทานตะวันมาสกัดน้ำมันจะพบปริมาณตะกั่วติดมากับผลผลิตน้ำมันในปริมาณน้อยมาก Pehlivan *et al.* (2008) รายงานว่าทานตะวันซึ่งปลูกในดินที่มีการปนเปื้อนโลหะหลายชนิด เมื่อนำเมล็ดมาสกัดเป็นน้ำมันพบว่า มีปริมาณตะกั่วในน้ำมันเพียง 0.0013 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานของตะกั่วที่ปนเปื้อนในอาหาร ซึ่งกำหนดไว้ที่ 0.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (SEPA, 2005)

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กองสำรวจดิน. 2523. **งานสำรวจดิน**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

ชูศักดิ์ จอมพุท. 2542. ทานตะวัน. น. 181-199. ใน **พืชไร่เศรษฐกิจ**. ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วัชร เลิศมงคล. 2542. ข้าวฟ่าง. น. 50-62. ใน **พืชไร่เศรษฐกิจ**. ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2339. **ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สำนักจัดการคุณภาพน้ำ. 2552. **สถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อมในห้วงคลิตี้. ใน: รายงานประจำปีสำนักจัดการคุณภาพน้ำ 2552**. กรมควบคุมมลพิษ, กรุงเทพฯ.

อลิสา วั่งใน. 2553. **การบำบัดสารมลพิษทางชีวภาพ**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Abreu, M.F., R.S. Berton and J.C. Andrade. 1997. Comparison of methods to evaluate of heavy metals in organic wastes. pp. 459-468. In Teresa M.H. and J.J. Benton, eds. **Soil and plant analysis in sustainable agriculture and environment**. Marcel Dekker, Inc., New York, New York.

Adesodun, J.K., M.O. Atayese, T.A. Agbaje, B.A. Osadiaye, O.F. Mafe and A.A. Soretire. 2010. Phytoremediation potential of sunflower (*Tithonia diversifolia* and *Helianthus annuus*) for metal in soil contaminated with zing and lead nitrates. **Water Air Soil Poll.** 207: 195-201.

Adriano, D.C. 1986. **Trace element in the terrestrial environment**. New York, Springer-Varlag.

Allica, J.H., J.M. Becerril and C. Garbisu. 2008. Assessment of the phytoextraction potential of high biomass crop plants. **Environ. Poll.** 152: 32-40

- Amacher, C.M. 1996. Nickel, Cadmium and Lead, pp. 739-768. In D.L. Sparks, ed. **Methods of Soil Analysis: Chemical Methods, Part 3-SSSA Book Series no.5**. Soil Sci. Am. Amer. Soc. of Agron. Madison, Wis.
- Anonymous. 1970. **Lab procedures**. Soil testing and plant analysis laboratory. Co-operative Extension Service. Athens, GA.
- Armen, R.K., C.O. Stockel and D.R. Huggins. 2007. Estimating grain and straw nitrogen concentration in grain crops based on aboveground nitrogen concentration and harvest index. **Agron. J.** 99: 158-165
- Baker, A.J.M. 1981. Accumulators and excluders strategies in the response of plants to heavy metals. **J. Plant Nutr.** 3: 634-654
- Blaylock, M.J., D.E. Salt, S. Dushenkov and O. Zakharova. 1997. Enhanced accumulation of lead in indian mustard by soil applied chelating agents. **Environ. Sci. Technol.** 31: 860-865
- Bose, S. and A.K. Bhattacharyya. 2008. Heavy metal accumulation in wheat plant grown in soil amended with industrial sludge. **Chemosphere** 70: 1264-1272
- Bray, R.H. and L.T. Kunzt. 1945. Determination of total organic and available form of phosphorus in soil. **Soil Sci.** 59: 39-45
- Brook, R.R., M.F. Chambers, L.J. Nicks and B.H. Robinson. 1998. Phytomining. **Trends Plant Sci.** 3: 359-362
- Chakroun, H.K., F. Souissi, J.L. Bouchardon, R. Souissi, J. Moutte, O. Faure, E. Remon and S. Abdeljaoued. 2010. Transfer and accumulation of lead, zinc, cadmium and copper in plant growing in abandoned mining district area. **Afr. J. Environ. Sci. Technol.** 4(10): 651-659

- Chandra, R., R.N. Bharagava, S. Yadav and D. Mohan. 2009. Accumulation and distribution of toxic metals in wheat (*Triticum aestivum* L.) and indian mustard (*Brassica campestris* L.) irrigated with distillery and tannery effluents. **J. Hazard. Material** 162: 1514-1521
- Chaney, R.L. 1989. Toxic element accumulation in soil and crop: protecting soil fertility and agriculture food-chains, pp. 140-158. In Y.B. Bar eds. **Inorganic contaminant in the vadose zone**. Springer-Varlag, Berlin.
- Changcun, L., J. Liu, L. Liu, T. Zhu, L. Sheng and D. Wang. 2009. Soil amendment application frequency contributed to phytoextraction of lead by sunflower at different nutrient level. **Environ. Exp. Bot.** 65: 410-416.
- Chapman, H.D. 1965. Cation exchange capacity, pp. 891-901. In C.A. Black, ed. **Methods of Soil Analysis Part 2 Chemical and Microbiological Properties**. Agronomy No. 9. Amer. Soc. of Agron. Inc., Madison, Wis.
- Devi, R.S. and M.N.V. Prasad. 1999. Membrane lipid alteration in heavy metal exposed plants, pp. 99-116 In M.N.V. Prasad and J. Hagemeyer, eds., **Heavy Metal Stress in Plant**. Springer-Varlag, Berlin.
- Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis, pp. 383-412. In A. Klute (ed.). **Methods of Soil Analysis, Part 1 Physical and Mineralogical Methods**. Soil Sci. Am. J., Madison, Wis.
- Greger, M. 1999. Metal availability and bioconcentration in plant, pp. 1-28. In M.N.V. Prasad and J. Hagemeyer, eds., **Heavy Metal Stress in Plant**. Springer-Varlag, Berlin.
- Gupta, A.K., S. Sinha. 2007. Phytoextraction capacity of the plants growing on tannery sludge dumping sites. **Bioresour. Technol.** 98: 1788-1794
- Ho, W.M., L.H. Ang and D.K. Lee. 2008. Assessment of Pb uptake, translocation and immobilization in kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) for phytoremediation of sand tailings. **J. Environ. Sci.** 20: 1341-1347

- Huang, J.W. and S.D. Cunningham. 1996. Phytoextraction species variation in lead uptake and translocation. **New Phytologist** 134: 362-368
- Jamali, M.K., T.G. Kazi, M.B. Arain, H.I. Afridi, N. Jalbani, G.A. Kandhro, A.Q. Shah and J.A. Baig. 2009. Heavy metal accumulation in different varieties of wheat (*Triticum aestivum* L.) growth in soil amended with domestic sewage sludge. **J. Hazard. Material** 164: 1386-1391
- Jarvis, S.C., L.H.P. Jones and J.M. Hopper. 1976. Cadmium uptake from solution by plant and its transport from root to shoots. **Plant and Soil** 44: 179-191
- Kabata-Pendias, A and H. Pandias. 1992. **Trace element in soil and plant 2nd ed.** CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kamal, M., A.E. Ghaly, N. Mahmoud and R. Cote. 2004. Phytoaccumulation of heavy metals by aquatic plants. **Environ. Inter.** 29: 1029-1039
- Laopaiboon, L., S. Nuanpeng, P. Srinophakun, P. Klanrit, P. Laopaiboon. 2009. Ethanol production from sweet sorghum juice using very high gravity technology: Effects of carbon and nitrogen supplementations. **Bioresour. Technol.** 100: 4176-4182
- Lasat, M.M. 2000. Phytoextraction of metals from contaminated soil: A review of plant soil metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues. **J. Hazard. Subs. Res.** 2: 1-25
- Levy, D.B., E.F. Redente and G.D. Uphoff. 1999. Evaluating the phytotoxicity of Pb-Zn tailings to big bluesteam (*Andropogon gerardii* Vitman) and switchgrass (*Panicum virgatum* L.) **Soil Sci.** 164(6): 363-375
- Losch, R. and K.I. Kohl. 1999. Plant respiration under the influence of heavy metals, pp. 139-156. In M.N.V. Prasad and J. Hagemeyer, eds., **Heavy Metal Stress in Plant**. Springer- Varlag, Berlin.

- Macek, T., D. Pavlikova and M. Mackova. 2004. Phytoremediation of metals and inorganic pollutants, pp. 135-158. *In* A. Singh and O.P. Ward, eds. **Applied Bioremediation and Phytoremediation**. Springer-Verlag
- Manara, A. 2012. Plant responses to heavy metal toxicity, pp. 27-53. *In* A. Furini, ed. **Plants and Heavy Metals**. Springer-Briefs.
- Marchiol, L., G. Fellet, D. Perosa and G. Zerbi. 2007. Removal of trace metals by *Sorghum bicolor* and *Helianthus annuus* in a site polluted by industrial wastes: A field experience. **Plant Physiol. Bioch.** 45: 379-387.
- Marchiol, L., S. Assolary, P. Sacco and G. Zerbi. 2004. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil. **Environ. Poll.** 132: 21-27.
- Marschener, H. 1995. **Mineral nutrition of higher plants**. Academic Press. Cambridge.
- Mohebbi, A.H., S.S. Harutyunyan and M. Chorom. 2012. Phytoremediation potential of three plant grown in monoculture and intercropping with date palm in contaminated soil. **Inter. J. Agri. Crop Sci.** 4(20): 1523-1530
- Mudgal, V., N. Madaan and A. Mudgal. 2010. Heavy metals in plants: phytoremediation: plants used to remediate heavy metal pollution. **Agric. Biol. J. N. Am.** 1: 40-46.
- Murillo, J.M., Maranon, T., Cabrera, F. and R. Lopez. 1999. Accumulation of heavy metals in sunflower and sorghum plants affected by the Guadamar spill. **Sci. Total Environ.** 242 : 281-292
- Nui, Z.X., L.N. Sun, T.H. Sun, Y.S. Li and H. Wang. 2007. Evaluation of phytoextracting cadmium and lead by sunflower, ricinus, alfalfa and mustard in hydroponic culture. **J. Environ. Sci.** 19: 961-967

- Panich-pat, T., P. Pokethitiyook, M. Kruatrachue, E.S. Upatham, P. Srinives and G.R. Lanza. 2004. Removal of lead form contaminated soil by *Typha angustifolia*. **Water Air Soil Poll.** 155: 159-171.
- Panich-pat, T., P. Srinives, M. Kruatrachue, P. Pokethitiyook, E.S. Upatham, and G.R. Lanza. 2005. Electron microscopic studies on localization of lead in organs of *Typha angustifolia* grown on contaminated soil. **Sci. Asia** 31:49-53
- Panich-pat, T. and P. Srinives. 2009. Partitioning of lead accumulation in rice plant. **Thai J. Agric. Sci.** 42(1): 35-40.
- Panich-pat, T., S. Upatham, P. Pokethitiyook, M. Kruatrachue and G.R. Lanza. 2010. Phytoextraction of metal contaminants by *Typha angustifolia*: Interaction of lead and cadmium in soil water micocosms. **J. Environ. Protec.** 1: 431-437
- Pehlivan, E., G. Arslan, F. Gode, T. Altun and M.M. Ozcan. 2008. Determination of some inorganic metals in edible vegetable oils by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AEC). **Grasas Y Aceites** 59(3): 239-244
- Poschenrieder, C. and J. Barcelo. 1999. Water relations in heavy metal stressed plants, pp. 207-230. In M.N.V. Prasad and J. Hagemeyer, eds., **Heavy Metal Stress in Plant**. Springer- Varlag, Berlin.
- Powell, J.M. and F.M. Hons. 1992. Fertilizer nitrogen and stover removal effect on sorghum yields and nutrient uptake and partitioning. **Agric. Ecosys. Environ.** 39: 197-211
- Prasad, M.N.V. 1999. Metallothioneins and metal binding complexes in plants, pp. 51-72. In M.N.V. Prasad and J. Hagemeyer, eds., **Heavy Metal Stress in Plant**. Springer- Varlag, Berlin.
- Prasad, M.N.V. and K. Strzatka. 1999. Impact of heavy metals on photosynthesis, pp. 117-138. In M.N.V. Prasad and J. Hagemeyer, eds., **Heavy Metal Stress in Plant**. Springer- Varlag, Berlin.

- Prasad, S., A. Singh, N. Jain, and H. C. Joshi. 2007. Ethanol Production from sweet sorghum syrup for utilization as automotive fuel in India. **Energy and Fuels** 21: 2415-2420
- Pratt, P.E. 1965. Potassium, pp. 1022-1030. In C.A. Blake, ed. **Methods of Soil Analysis. Part II. Chemical and Microbiological Properties**. Agronomy No. 9. Amer. Soc. of Agron. Inc., Madison, Wis.
- Rhoades, J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids, pp. 417-435. In D.L. Sparks et al., eds., **Methods of Soil Analysis Part 3 Chemical Methods**. Soil Sci. Am. J., Madison, Wis.
- Salt, D.E., R.C. Prince and I.J. Pickering. 1995. Mechanism of cadmium mobility and accumulation in indian mustard. **J. Plant Physiol.** 109: 1427-1433
- Sekara, A., M. Poniedzialek, J. Ciura and E. Jedrszczyk. 2005. Cadmium and lead accumulation and distribution in the organs of nine crops: implication for phytoremediation. **Polish J. Environ. Studies** 14(4): 509-516
- SEPA. 2005. Maximum levels of contaminant in food. In GB 2762-2005. **State Environmental Protection Administration**. Beijing.
- Sinegani, A.A.S. and F. Khalilikhah. 2008. Phytoremediation of lead by *Helianthus annuus*: effect of mobilising agent application time. **Plant Soil Environ.** 54(10): 434-440.
- Singh, R.P., R.D. Tripathi, S. Dabas, S.M.H. Rizvi, M.B. Ali, S.K. Sinha, D.K. Gupta, S. Mishra and U.N. Rai. 2003. Effect of lead on growth and nitrate assimilation of *Vigna radiata* (L.) Wilczek seedling in a salt affected environment. **Chemosphere** 52:1245-1250
- Tanhan, P., M. Kruatrachue, P. Pokethitiyook and R. Chaiyarat. 2007. Uptake and accumulation of cadmium, lead and zing by siam weed [*Chromoleana odorata* (L.) King & Robinson]. **Chemosphere** 68: 323-329

- Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity, pp. 475-490. *In* D.L. Sparks et al., eds., **Methods of Soil Analysis Part 3 Chemical Methods**. Soil Sci. Am. J., Madison, Wis.
- Ullah, R., J. Bakht, M. Sahfi, M. Lqbal, A. Khan and M. Saeed. 2011. Phytoaccumulation of heavy metals by sunflower (*Helianthus annuus* L.) grown on contaminated soil. **Alf. J. Biotechnol.** 10(75): 17192-17198
- Vamerali, T., M. Bandiera and G. Mosca. 2010. Field crop for phytoremediation of metal contaminated land. A review. **Environ. Chem. Lett.** 8: 1-17
- Walkley, A. And C.A. Black. 1934. An examination of degradation method for determining soil organic matter: a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Sci.** 37:29-35
- Wang, Z.W., Z.R. Nan, S.L. Wang and Z.J. Zhao. 2011. Accumulation and distribution of cadmium and lead in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in contaminated soils from the oasis, north-west china. **J. Sci. Food Agric.** 91:377-384
- Wei, S., Q. Zhou, H. Xiao, C. Yang, Y. Hu and L. Rin. 2009. Hyperaccumulative property comparison of 24 weed species to heavy metals using a pot culture experiment. **Environ. Monit. Assess.** 152: 299-307
- Xiang, S., X. Zhang, G. Chen, Y. Chen, L. Wang and X. Shan. 2011. Seeding growth and metal accumulation of selected woody species in copper and lead/zinc mine tailing. **J. Environ. Sci.** 23(2): 266-274
- Yoon, J., X. Cao, Q. Zhou and L.Q. Ma. 2006. Accumulation of Pb, Cu and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. **Sci. Total Environ.** 368: 456-464.
- Zhuang, P., W. Shu, Z. Li, B. Liao, J. Li and J. Shao. 2009. Removal of metals by sorghum plants from contaminated land. **J. Environ. Sci.** 21: 1432-1437.

Zou, T., T. Li, X. Zhang, H. Yu and H. Huang. 2012. Lead accumulation and phytostabilization potential of dominant plant species growth in a lead zinc mine tailing. **Environ. Earth Sci.** 65: 621-630





ภาคผนวก

ตารางภาคผนวกที่ 1 ความสูงของทานตะวันและข้าวฟ่างในการปลูกครั้งที่หนึ่ง (เซนติเมตร)

ชุดการทดลอง		35 วัน	70 วัน	105 วัน
ทานตะวัน	ดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว	35±5.2	118.20±4.6	122.4±4.7
	ดินปนเปื้อนตะกั่ว	36.6±3.2	117.6±2.9	121.6±2.7
ข้าวฟ่าง	ดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว	125.4±12.4	280.5 ±4.6	285.5±6.6
	ดินปนเปื้อนตะกั่ว	119.8±7.6	286.3±7.6	218.9±7.9

ตารางภาคผนวกที่ 2 ความสูงของทานตะวันและข้าวฟ่างในการปลูกครั้งที่สอง (เซนติเมตร)

ชุดการทดลอง		35 วัน	70 วัน	105 วัน
ทานตะวัน	ดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว	57.2±8.5	122.4±4.2	120.0±2.7
	ดินปนเปื้อนตะกั่ว	51.0±7.1	119.6±3.6	117.0±3.2
ข้าวฟ่าง	ดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว	94.4±9.3	255.2±25.8	237.6±29.9
	ดินปนเปื้อนตะกั่ว	109.6±9.3	264.4±5.8	244.0±17.0

ตารางภาคผนวกที่ 3 น้ำหนักแห้งของทานตะวันและข้าวฟ่างในการปลูกครั้งที่หนึ่ง (กรัม)

ชุดการทดลอง		35 วัน	70 วัน	105 วัน
ทานตะวัน	ดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว	4.8±0.7	53.2±10.4	77.1±9.8
	ดินปนเปื้อนตะกั่ว	5.9±1.1	40.9±2.9	71.1±5.8
ข้าวฟ่าง	ดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว	11.1±4.3	133.1±16.1	156.1±39.2
	ดินปนเปื้อนตะกั่ว	11.4±2.3	110.3±7.5	139.9±16.1

ตารางภาคผนวกที่ 4 น้ำหนักแห้งของทานตะวันและข้าวฟ่างในการปลูกครั้งที่สอง (กรัม)

ชุดการทดลอง		35 วัน	70 วัน	105 วัน
ทานตะวัน	ดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว	15.5±2.8	67.2±12.4	81.8±13.1
	ดินปนเปื้อนตะกั่ว	10.4±3.5	60.8±7.3	78.0±8.7
ข้าวฟ่าง	ดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว	10.6±2.7	133.8±19.8	118.7±16.4
	ดินปนเปื้อนตะกั่ว	7.4±2.6	134.8±21.9	123.5±22.4

ตารางภาคผนวกที่ 5 ค่า Tolerance index (TI) ของทานตะวันและข้าวฟ่าง

ชุดการทดลอง		35 วัน	70 วัน	105 วัน
ทานตะวัน	ปลูกครั้งที่หนึ่ง	1.27±0.4	0.79±0.19	0.93±0.07
	ปลูกครั้งที่สอง	0.58±0.14	0.78±0.09	0.86±0.09
ข้าวฟ่าง	ปลูกครั้งที่หนึ่ง	0.85±0.37	0.79±0.08	0.88±0.10
	ปลูกครั้งที่สอง	0.71±0.22	1.01±0.16	0.99±0.16

ตารางภาคผนวกที่ 6 ความเข้มข้นตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วในการปลูกครั้งที่หนึ่ง (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

ชุดทดลอง	35 วัน		70 วัน			105 วัน			
	ราก	ลำต้นและใบ	ราก	ลำต้นและใบ	ดอก	ราก	ลำต้นและใบ	เปลือก	เมล็ด
ทานตะวัน	2.50±1.31	1.84±0.72	4.01±0.25	2.97±0.28	0.41±0.36	5.41±0.23	3.45±2.92	1.31±0.94	0.10±0.13
ข้าวฟ่าง	3.82±2.42	0.52±0.62	5.44±0.73	1.32±1.74	2.44±1.63	3.13±0.05	1.23±1.34	0.97±1.07	0.08±0.04

ตารางภาคผนวกที่ 7 ความเข้มข้นตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในการปลูกครั้งที่หนึ่ง (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

ชุดทดลอง	35 วัน		70 วัน			105 วัน			
	ราก	ลำต้นและใบ	ราก	ลำต้นและใบ	ดอก	ราก	ลำต้นและใบ	เปลือก	เมล็ด
ทานตะวัน	84.66±5.10	17.47±3.40	100.36±18.85	10.95±4.76	3.66±0.95	134.82±14.90	14.69±1.03	1.82±1.71	0.72±0.65
ข้าวฟ่าง	79.69±4.87	13.47±5.68	76.80±3.94	13.38±3.27	3.91±1.53	109.24±39.44	14.04±3.59	1.93±1.28	0.65±0.21

ตารางภาคผนวกที่ 8 ความเข้มข้นตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่วในการปลูกครั้งที่สอง (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

ชุดการทดลอง	35 วัน		70 วัน			105 วัน			
	ราก	ลำต้นและใบ	ราก	ลำต้นและใบ	ดอก	ราก	ลำต้นและใบ	เปลือก	เมล็ด
ทานตะวัน	1.92±0.74	0.58±0.62	3.11±1.07	0.42±0.75	0.31±0.46	5.51±0.86	3.0±1.47	0.91±0.84	0.13±0.22
ข้าวฟ่าง	3.50±1.16	0.59±0.68	2.67±1.32	1.44±1.54	0.21±0.18	4.03±1.68	1.35±2.33	0.35±0.61	0.01±0.02

ตารางภาคผนวกที่ 9 ความเข้มข้นตะกั่วในส่วนต่าง ๆ ของทานตะวันและข้าวฟ่างที่ปลูกในดินที่ปนเปื้อนตะกั่วในการปลูกครั้งที่สอง (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

ชุดการทดลอง	35 วัน		70 วัน			105 วัน			
	ราก	ลำต้นและใบ	ราก	ลำต้นและใบ	ดอก	ราก	ลำต้นและใบ	เปลือก	เมล็ด
ทานตะวัน	48.26±12.43	10.72±0.38	79.61±19.28	8.39±2.03	1.50±1.55	122.27±18.74	12.61±1.28	2.03±0.67	0.87±0.7
ข้าวฟ่าง	36.18±9.62	5.08±1.54	48.57±6.91	5.67±3.74	1.04±0.90	72.53±9.13	5.34±2.22	2.06±1.79	0.78±0.8

ตารางภาคผนวกที่ 10 ความเข้มข้นตะกั่วในดินก่อนการปลูกพืช หลังการปลูกพืชครั้งที่หนึ่ง และหลังการปลูกพืชครั้งที่สอง (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

ชุดทดลอง	ระยะเวลา (วัน)	ความเข้มข้นตะกั่วในดิน (มก./กก. น้ำหนักแห้ง)		
		ก่อนปลูก	หลังปลูกครั้งที่ 1	หลังปลูกครั้งที่ 2
ควบคุม	-	1,446.9±47.3	1,419.1±33.9	1,417.9±24.7
ทานตะวัน (ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว)	35	1,438.7±44.3	1,331.5 ±14.3	1,296.7±85.8
	70	1,383.9±38.3	1,350.2±38.0	1,270.0±47.2
	105	1,444.3±34.4	1,399.1±59.1	1,300.9±92.1
ข้าวฟ่าง (ปลูกในดินปนเปื้อนตะกั่ว)	35	1,425.1±32.1	1,353.3±61.1	1,323.6±59.1
	70	1,377.3±34.7	1,307.6±24.3	1,220.0±35.9
	105	1,410.2±18.1	1,368.1±32.8	1,311.9± 9.3
ทานตะวัน (ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว)	35	33.2±3.8	29.1±0.8	28.1±3.6
	70	30.7±3.7	26.4±1.1	22.2±4.4
	105	33.7±3.4	24.8±0.7	22.3±0.8
ข้าวฟ่าง (ปลูกในดินไม่ปนเปื้อนตะกั่ว)	35	33.6±4.4	25.4±1.1	25.4±2.4
	70	30.8±4.3	25.8±2.5	22.2±1.8
	105	31.0±5.1	24.0 ±1.0	21.6±3.1

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายสายชล สุขญาณกิจ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	26 กรกฎาคม พ.ศ. 2530
สถานที่เกิด	อำเภอบางไทร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) สาขาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	(1) ทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2555 (ศูนย์ส่งเสริมการวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยี) (2) ทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยประเภทวิทยานิพนธ์ ระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2555 (บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์) (3) ทุนผู้ช่วยสอนประจำปีงบประมาณ 2554 (บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)