การกำจัดสารหนูและแมงกานีส บริเวณบ่อเก็บกากโลหกรรมเหมืองแร่ทองคำด้วยพืช

Phytoremediation of Arsenic and Manganese from Tailing Storage Facility at Gold Mining

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช[1,2,3*] พรรณวดี สุวัฒิกะ[4] และ กรองแก้ว ทิพยศักดิ์[5]

[1]สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

[2]โปรแกรมวิจัยการจัดการสารพิษในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

[3]หน่วยปฏิบัติการวิจัยการจัดการพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักจากอุตสาหกรรมและการทำเหมือง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

[4]คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

[5]คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

[*]Corresponding Author, E-mail: pantawat.s@chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการฟื้นฟูและบำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนสารหนู (As) และแมงกานีส (Mn) ด้วยพืชใบเลี้ยงคู่ 3 ชนิด ได้แก่ กระถินเทพา (*Acacia mangium*) กระถินยักษ์ (*Leucaena leucocephala*) และกระถินณรงค์ (*Acacia auriculiformis*) ทำการปลูกพืชทดลองทั้ง 3 ชนิดในบริเวณพื้นที่บ่อเก็บกากโลหกรรมจากการทำเหมืองแร่ทองคำ ทำการศึกษาการเจริญเติบโต การแสดงความเป็นพิษ การดูดดึง และการสะสมของ As และ Mn ในส่วนราก ลำต้น และใบของพืชทดลองในระยะเวลา 6 เดือนผลการวิเคราะห์กากโลหกรรมในบ่อกักเก็บก่อนทำการทดลอง พบว่า มีปริมาณ As และ Mn เฉลี่ยเท่ากับ 51.03±0.74 และ 1,670±0.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และภายหลังทำการปลูกพืชทดลองพบว่า กระถินเทพามีปริมาณการสะสม As และ Mn เท่ากับ 7.03±0.80 และ 166.00±22.16 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งของพืชทั้งต้น ตามลำดับ สำหรับกระถินณรงค์มีความสามารถในการสะสม As และ Mn เท่ากับ 6.56±1.14 และ 172.75±29.37 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งของพืชทั้งต้น ตามลำดับสำหรับกระถินยักษ์มีความสามารถในการสะสม As และ Mn ได้เท่ากับ 0.60±0.08 และ 16.10±2.29 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งของพืชทั้งต้น ตามลำดับ ทั้งนี้ใบและลำต้นของพืชทดลองมีการสะสม As และ Mn ในปริมาณที่มากใกล้เคียงกัน และมีค่าการสะสมน้อยในส่วนของรากซึ่งการดูดดึง As ด้วยกระถินเทพามีค่าใกล้เคียงกับกระถินณรงค์และมากกว่ากระถินยักษ์ ส่วน Mn กระถินณรงค์มีการดูดดึงได้ดีกว่ากระถินยักษ์และกระถินเทพา สำหรับอัตราการเจริญเติบโตของพืชเมื่อเทียบด้วยน้ำหนักแห้ง พบว่า กระถินเทพามีน้ำหนักแห้งสูงสุด รองลงมา คือ กระถินณรงค์ และกระถินยักษ์ มีค่าเท่ากับ 1,365.24, 1,267.88 และ 122.16 กรัมต่อต้นพืชตามลำดับ และมีการแสดงความเป็นพิษเฉลี่ย เท่ากับ 4.81, 5.27 และ 34.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับอย่างไรก็ตามจากผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า กระถินเทพาและกระถินณรงค์เป็นพืชที่มีความสามารถ และมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในการกำจัดพื้นที่ปนเปื้อน As และ Mn ได้

ABSTRACT

The phytoremediation and removal efficiency of dicotyledon cultivated in Arsenic (As) and Manganese (Mn) contaminated area were focused in this study. Three kinds of dicotyledon, *Acacia mangium*, *Leucaena leucocephala* and *Acacia auriculiformis*, were selected and used as remediated species. All plants were cultivated in the Tailing Storage Facility area (TSF) at the Gold Mine for 6 months. Their toxicity symptoms, uptake and accumulations of As and Mn in root, stem and leaves were also observed. In addition, contaminated soil was analyzed for background As and Mn. The result showed that TSF soil have been contaminated with As and Mn at 51.03+0.74 and 1,670+0.18 mg/kg of dried soil, respectively. At the 6th month of cultivation, both soil and plant samples were collected then analyzed for As and Mn accumulation. Results showed that As and Mn had been accumulated in the whole parts of *A. mangium* at7.03±0.80 and 166.00±22.16 mg/kg, respectively. *A. auriculiformis* accumulations were 6.56±1.14 and 172.75±29.37 mg/kg for As and Mn, respectively. Meanwhile, *L. leucocephala* was the lowest accumulated specie (As =0.60±0.08 and Mn =16.10±2.29 mg/kg). Moreover, the highest accumulation of As and Mn were found in both leaves and stem rather than in root. For As accumulation in dicotyledon species, *A. mangium* had become the highest As accumulated specie followed by *A. auriculiformis* and *L. leucocephala*, respectively. For Mn accumulation, *A. auriculiformis* was the highest Mn accumulated specie followed by *L. leucocephala* and *A. mangium*, respectively. As considered growth rate of dicotyledon, biomass of *A. mangium* dried was greater than *A. auriculiformis* and *L. leucocephala* (1,365.24, 1,267.88 and 122.16 g/plant, respectively) and toxic sign showed at 4.81, 5.27 and 34.25% respectively. Overall, it was obvious that both, *A. mangium* and *A. auriculiformis* had showed their tolerance on As and Mn accumulation and also suitable to be used for TSF site remediation.

คำสำคัญ: การบำบัดด้วยพืช สารหนู แมงกานีส ความเป็นพิษของพืช เหมืองทอง บ่อเก็บกากโลหกรรม

Keywords: Phytoremediation, Arsenic, Manganese, Phytotoxicity, Gold mining, Tailing Storage Facility

บทนำ

กระบวนการทำเหมืองแร่ทองคำมักมีของเสียเกิดขึ้นทั้งในรูปของกากแร่หรือหางแร่ น้ำเสียจากกระบวนการผลิต และยังมีโลหะหนักชนิดอื่นๆซึ่งเป็นสินแร่ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เมื่อมีการขุดสินแร่ออกมาจึงเป็นสาเหตุหนึ่งในการกระตุ้นให้สารโลหะหนักดังกล่าวออกสู่สิ่งแวดล้อมเมื่อการชะล้างจากน้ำฝนและ/หรือการรั่วซึมจากบ่อกักเก็บกากแร่ จึงส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนโลหะหนักในพื้นที่บริเวณรอบเหมืองแร่ทองคำมากยิ่งขึ้นซึ่งโลหะหนักที่ปนเปื้อนมีหลายชนิด อาทิ สารหนู แมงกานีส ตะกั่ว และแคดเมียม (ธัญญาภรณ์, 2553) สารโลหะหนักดังกล่าวก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะมนุษย์สามารถได้รับสารโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายผ่านทางการหายใจ การรับประทาน และการสัมผัสทางผิวหนัง (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) โดยสารหนูหากได้รับการสัมผัสติดต่อกันเป็นเวลานานอาจทำให้เกิดมะเร็งผิวหนัง รวมทั้งมีผลต่อทารกในครรภ์และมีฤทธิ์ต่อการกลายพันธุ์ (เกศ, 2555) ส่วนแมงกานีส หากได้รับเข้าสู่ร่างกายติดต่อกันเป็นเวลานานจะมีผลต่อระบบประสาทเป็นส่วนมาก ระบบประสาทถูกทำลายพฤติกรรมเปลี่ยนแปลง ไม่สามารถพูดได้ชัดเจนอย่างปกติและเมื่ออยู่ในระยะรุนแรงจะมีอาการคล้ายคนเป็นโรคพาร์กินสัน (วิวัฒน์, 2555) ปัจจุบันเทคโนโลยีในการบำบัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในดินมีวิธีการบำบัดอยู่หลากหลายวิธี โดยแนวคิดในการใช้พืชบำบัดบริเวณพื้นที่บ่อกักเก็บกากโลหกรรมของการทำเหมืองแร่ทองคำที่ปนเปื้อนสารหนูและแมงกานีสนั้นสามารถช่วยลดการกระจายสารปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ลดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ได้ เป็นวิธีที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อนยุ่งยาก และคาดว่ามีค่าใช้จ่ายที่ไม่แพง ซึ่งอาศัยกระบวนการทางธรรมชาติของพืชที่สามารถดูดดึงธาตุอาหารต่างๆ รวมถึงสารโลหะหนักและสารมลพิษที่อยู่ในดิน โดยพืชแต่ละชนิดจะมีกลไกในการกำจัดสารพิษที่แตกต่างกันซึ่งจำเป็นต้องใช้

ระยะเวลาในการบำบัด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ อาทิ ศักยภาพของการดูดดึง และความทนทานต่อสารโลหะหนักของพืชแต่ละชนิด (มาลินี, 2544; Brown et al., 1995)

การศึกษาการบำบัดสารปนเปื้อนด้วยพืชในครั้งนี้ พืชที่เลือกใช้เป็นพืชใบเลี้ยงคู่ 3 ชนิด ได้แก่ กระถินเทพา (*Acacia mangium* Willd.) กระถินยักษ์ (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de wit.) และกระถินณรงค์ (*Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth.) ซึ่งเป็นพืชท้องถิ่นที่พบในบริเวณพื้นที่ศึกษา มีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมเจริญเติบโตเร็ว และสามารถปลูกได้ทั่วไป นอกจากนี้พืชทดลองที่มีการเจริญเติบโตเร็ว (Rapid Growth) มีศักยภาพในการให้เยื่อไม้สูงสามารถนำไปผลิตเป็นกระดาษ รวมถึงการแปรรูปเพื่อใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ได้ (สาวิตรี, 2548; กรมป่าไม้, 2556) การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการเจริญเติบโตและการแสดงความเป็นพิษของพืชทดลองในพื้นที่ปนเปื้อนสารหนูและแมงกานีส และเพื่อเปรียบเทียบปริมาณการสะสมสารหนูและแมงกานีสในส่วนราก ลำต้นและใบของพืชทดลอง

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมการทดลอง

การเตรียมแปลงทดลองในพื้นที่บ่อกักเก็บกากโลหกรรมที่มีการปนเปื้อนจริง จำนวน 3 แปลงสำหรับพืชทดลอง 3 ชนิด โดยแต่ละแปลงขุดหลุมสำหรับใช้ในการปลูกพืช 18 หลุม แต่ละหลุมมีขนาด 30×30×30 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างหลุม 1 เมตรทำการคัดเลือกพืชทดลองที่ได้จากการขยายพันธุ์ด้วยวิธีเพาะเมล็ดในโรงเรือน ให้มีขนาดใกล้เคียงกัน ปลูกลงในแต่ละแปลงที่เตรียมไว้ พร้อมทั้งใส่พอลิเมอร์ (สารอุ้มน้ำ) ปริมาณ 1,000 กรัม ขี้เถ้าแกลบ 100 กรัม และปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 จำนวน 30 กรัม ในช่วงเริ่มปลูก และใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 จำนวน 30 กรัม อีกครั้งเมื่อครบ 2 เดือน พร้อมทั้งดูแลรักษาด้วยการรดน้ำในช่วงเช้าทุกวัน ประมาณ 1 ลิตรต่อต้นทั้งนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างกากโลหกรรม พืช และน้ำที่ใช้รด มาทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูและแมงกานีสก่อนทำการปลูกพืชทดลอง(จากการวิเคราะห์น้ำที่ใช้รดไม่พบการปนเปื้อนสารดังกล่าว) สำหรับการเก็บตัวอย่างกากโลหกรรมเป็นแบบ Composite samples โดยเก็บกระจาย 5 จุด ต่อ 1 แปลงสำหรับน้ำที่ใช้รดทำการเก็บมาทำการวิเคราะห์คุณสมบัติก่อนใช้และเดือนแรกและเดือนที่สามของการทดลอง

1.1 การเก็บตัวอย่างพืชและกากโลหกรรม

1.1.1 ตัวอย่างพืช เก็บตัวอย่างพืชทดลองภายหลังทำการปลูก ที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน เป็นจำนวน 3 ต้น ในแต่ละครั้งจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำประปา 3-4 ครั้ง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 1 ครั้ง ผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นแบ่งตัวอย่างพืชแต่ละต้นออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ ชั่งน้ำหนักสดแล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแห้งแล้วทำการบดแบบแยกส่วนราก ลำต้น และใบให้ละเอียด

1.1.2 ตัวอย่างกากโลหกรรม เก็บตัวอย่างกากโลหกรรมหลังทำการปลูกพืช โดยเก็บในหลุมเดียวกันกับที่เก็บพืชทดลอง ที่ระยะเวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 วัน จากนั้นนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24-48 ชั่วโมง แล้วทำการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร

1.2 การวิเคราะห์ตัวอย่างพืชและกากโลหกรรม

วิเคราะห์หาปริมาณสารหนูและแมงกานีสในส่วน ราก ลำต้น และใบ ของตัวอย่างพืชและตัวอย่างกากโลหกรรมตามวิธีการของUSEPA method 3052 (USEPA., 1996) ย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave digestion)แล้วตรวจวัดปริมาณสารหนูและแมงกานีสทั้งหมดด้วยเครื่องอะตอมมิกแอปซอร์ปชั่นสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer; AAS)

2. การศึกษาการเจริญเติบโตของพืช

ทำการศึกษาการเจริญเติบโตของพืชด้านความสูง น้ำหนักแห้ง และอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ซึ่งพิจารณาได้จากน้ำหนักแห้งของพืชคำนวณได้ดังสมการที่ 1 (Hoffmann and Poorter., 2002)

$$\mathbf{RGR} = \frac{[\mathrm{Ln}(W_2) - \mathrm{Ln}(W_1)]}{(t_2 - t_1)} \quad \text{..... (1)}$$

เมื่อ RGR = อัตราการเจริญเติบโต (กรัมต่อวัน)

W_1 = น้ำหนักแห้งของพืชที่เวลาเริ่มทดลอง (กรัม)

W_2 = น้ำหนักแห้งของพืชที่เวลาหลังทดลอง (กรัม)

t_1 = เวลาเริ่มทดลอง (วัน)

t_2 = เวลาหลังทดลอง (วัน)

Ln = Natural logarithm

3. การศึกษาความเป็นพิษของพืช

การแสดงความเป็นพิษที่พืชได้รับที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ180 วัน ได้คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของการแสดงความเป็นพิษบริเวณใบ โดยทำการประเมินจากการสังเกตด้วยสายตา บันทึกข้อมูลและทำการให้คะแนนซึ่งแสดงรายละเอียดการประเมิน (ตารางที่ 1) และแทนค่าในสมการที่ 2 (Brown et al., 1991)

$$\frac{(\mathbf{A_0xB_0})+(\mathbf{A_1xB_1})+(\mathbf{A_2xB_2})+(\mathbf{A_3xB_3})+(\mathbf{A_4xB_4})+(\mathbf{A_5xB_5})\mathbf{x100}}{(\mathbf{A_r}\mathbf{xB_r})} \quad .....(2)$$

เมื่อ A = จำนวนใบพืชที่แสดงความเป็นพิษในระดับต่างๆ (ระดับใบพืช ตั้งแต่ไม่แสดงความเป็นพิษจนถึงใบที่แสดงความเป็นพิษทั้งใบ คือ A_0ถึง A_5)

B = คะแนนที่แสดงความเป็นพิษ (คะแนนตั้งแต่ 0 ถึง 5 คือ B_0 ถึง B_5)

A_r = จำนวนใบทั้งหมด

B_r = คะแนนความเป็นพิษสูงสุด 5 คะแนน

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี Analysis of variance (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p \leq 0.05$) และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลด้วยวิธีการของ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Statistical Package for the Social Science (SPSS)

ตารางที่ 1 เกณฑ์แสดงอาการความเป็นพิษของพืชทดลอง

ระดับความเป็นพิษ (คะแนน)	การแสดงความเป็นพิษของพืชทดลอง
0	พืชปกติไม่มีการเปลี่ยนสีของใบ
1	ความเป็นพิษต่อพืชเล็กน้อย แผ่นใบเริ่มมีสีเหลืองหรือเหลืองซีด
2	ความเป็นพิษต่อพืชเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แผ่นใบเหลืองหรือเหลืองซีด
3	ความเป็นพิษต่อพืชเพิ่มมากขึ้น แผ่นใบเหลืองหรือไหม้ 50 เปอร์เซ็นต์
4	ความเป็นพิษต่อพืชรุนแรง ใบเหลืองหรือไหม้เกือบทั้งแผ่นใบ
5	ความเป็นพิษต่อพืชรุนแรงมาก ใบพืชเหลืองหรือแห้งไหม้ทั้งใบ

ที่มา: การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืช (พันธวัศ, 2558)

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

1. สมบัติเบื้องต้นของกากโลหกรรม

จากผลการวิเคราะห์กากโลหกรรม พบว่า ในแปลงทดลองปลูกกระถินเทพา กระถินยักษ์ และกระถินณรงค์ มีปริมาณการสะสมสารหนูเฉลี่ยเท่ากับ 51.03 $\pm$ 0.74 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีการสะสมแมงกานีสเฉลี่ย เท่ากับ 1,670.71$\pm$ 0.18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ระหว่าง 6.3-6.8 ซึ่งถือว่ามีความเป็นกรดอ่อน และมีค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) เฉลี่ย 1,858.67 ไมโครซีเมนต่อเซนติเมตร แสดงให้เห็นว่ากากโลหกรรมมีปริมาณไอออนที่ละลายน้ำออกมาไม่มากนัก ที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพืช หากแต่มีแนวโน้มของการสะสมโลหะหนักรวมในพื้นที่

2. ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูในส่วนต่างๆ ของพืชด้วยน้ำหนักแห้ง 1 กิโลกรัม

การวิเคราะห์ปริมาณการสะสมสารหนูในพืชทดลองทั้ง 3 ชนิดก่อนทำการปลูกพืชในแปลงทดลอง เมื่อนำมาวิเคราะห์ทั้งต้นโดยไม่แยกส่วน พบว่า กระถินเทพา กระถินยักษ์ และกระถินณรงค์ มีปริมาณสารหนูเฉลี่ยเท่ากับ 0.46±0.13, 0.44±0.06 และ 0.41±0.01 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) สำหรับผลการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูในตัวอย่างพืชในช่วงระยะเวลาของการทดลองสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

2.1 การสะสมสารหนูในส่วนรากพบว่า กระถินยักษ์และกระถินณรงค์มีแนวโน้มของการสะสมสารหนูที่เพิ่มขึ้นตลอด

ระยะเวลาของการทดลอง สำหรับกระถินเทพา ในช่วงระยะเวลาของการทดลองที่ 60 วัน มีค่าปริมาณการสะสมสารหนูที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนอาจเนื่องมาจากรากของกระถินเทพามีศักยภาพในดูดดึงสารหนูได้ดีอีกทั้งในช่วงระยะเวลาดังกล่าวเป็นช่วงฤดูฝนทำให้สารหนูมีการชะละลายได้ดีรากพืชจึงดูดดึงได้และปริมาณสารหนูลดลงเล็กน้อยเมื่อการทดลองถึงช่วง 120 วัน ซึ่งเป็นช่วงหมดฤดูฝนอย่างไรก็ตามค่าปริมาณสารหนูยังคงมีค่าที่สูงในช่วงระยะเวลาดังกล่าวจากนั้นที่ระยะ 150 – 180 วันของการทดลองพบว่า กระถินเทพามีความสามารถในการสะสมสารหนูที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเป็นไปอย่างปกติ (รูปที่ 1ก) และเมื่อทำการวิเคราะห์พืชทดลองทั้ง 3 ชนิดที่ 180 วันของการทดลองพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) ซึ่งกระถินณรงค์มีความสามารถในการสะสมสารหนูในส่วนรากมากที่สุดรองลงมา ได้แก่ กระถินเทพาและกระถินยักษ์ มีค่าเท่ากับ 5.35±0.15, 5.12±0.17 และ 4.99±0.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ

2.2 การสะสมสารหนูในส่วนลำต้น พบว่ากระถินเทพาและกระถินณรงค์มีแนวโน้มของการสะสมสารหนูเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาของการทดลอง สำหรับกระถินยักษ์มีการสะสมสารหนูลดลงที่ 90 วัน (รูปที่ 1ข) อาจเนื่องมาจากกระถินยักษ์มีการตอบสนองต่อความเป็นพิษของสารหนู ซึ่งสารหนูเมื่อสะสมในพืชจะเข้าไปสู่กระบวนการเมทาบอลิซึม ซึ่งส่งผลให้พืชมีการสังเคราะห์แสงและดูดดึงแร่ธาตุที่มีอยู่ในดินได้น้อยลง (Singh et al., 2006) ทั้งนี้มีตัวอย่างงานวิจัยที่แสดงประสิทธิภาพการสะสมโลหะหนักที่ต่ำในพืชบริเวณพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูง อาจมีสาเหตุมาจากความเป็นพิษของโลหะหนัก (Garcia et al.,1998) การศึกษาครั้งนี้ยังพบการสะสมโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นเมื่อครบ 180 วันของการทดลองโดยการสะสมสารหนูในส่วนลำต้นของพืชทดลองทั้ง 3 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งกระถินณรงค์มีความสามารถในการสะสมสารหนูในส่วนลำต้นมากที่สุดรองลงมา ได้แก่ กระถินเทพา และกระถินยักษ์ มีค่าเท่ากับ 5.39±0.05, 5.17±0.09 และ 4.92±0.22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ (รูปที่ 1ข)

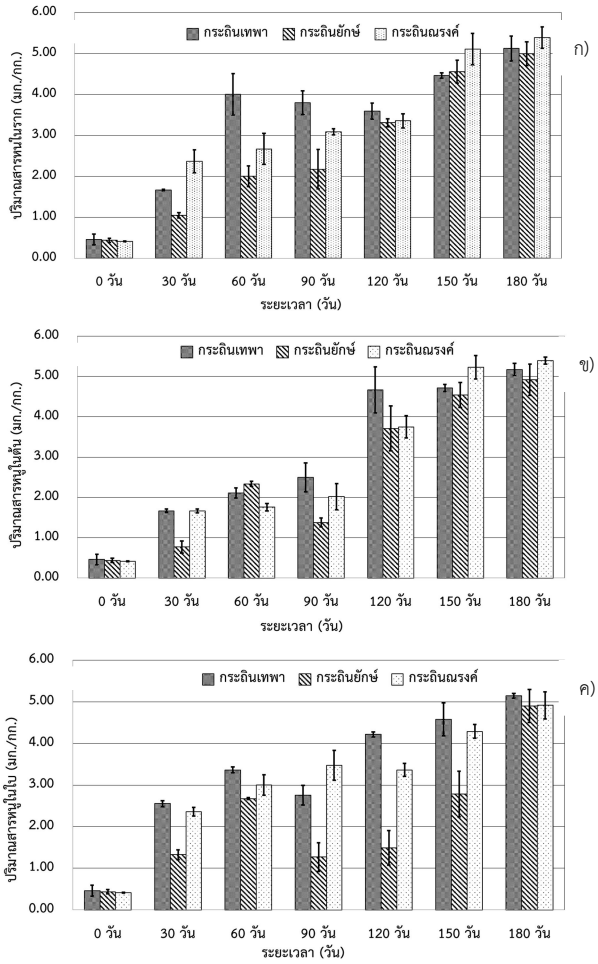
2.3 การสะสมสารหนูในส่วนใบ พบว่าพืชทดลองทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มของการสะสมสารหนูที่เพิ่มขึ้น ตั้งแต่ระยะเวลา 0 วัน จนถึง 180 วัน โดยกระถินเทพามีความสามารถในการสะสมสารหนูในส่วนใบเพิ่มขึ้นในช่วง 30 – 60 วัน มีความสอดคล้องกับผลการดูดดึงของกระถินเทพาที่รากมีประสิทธิภาพในการดูดดึงสารหนูสูงในช่วงฤดูฝนที่ระยะเวลาของการทดลอง 60 วัน สำหรับกระถินยักษ์มีการสะสมสารหนูลดลงที่ 90 – 120 วันของการทดลอง (รูปที่ 1ค) และเมื่อทำการทดลองครบ 180 วัน พบว่าการสะสมสารหนูในส่วนใบของพืชทดลองทั้ง 3 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยกระถินเทพามีการสะสมสารหนูในส่วนใบมากที่สุดรองลงมา ได้แก่ กระถินณรงค์ และกระถินยักษ์ มีค่าเท่ากับ 5.14±0.06, 4.91±0.19 และ 4.90±0.23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ

3. ผลการวิเคราะห์ปริมาณแมงกานีสในส่วนต่างๆของพืช

ผลการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมแมงกานีสในพืชทั้ง 3 ชนิดก่อนทำการปลูกพืชทดลอง พบว่า กระถินเทพา กระถินยักษ์และกระถินณรงค์ มีปริมาณการสะสมแมงกานีสทั้งต้นโดยไม่แยกส่วนเฉลี่ยเท่ากับ 37.48±2.34, 37.18±3.36 และ 28.37±1.28 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับสำหรับผลการวิเคราะห์ปริมาณแมงกานีสในตัวอย่างพืชในช่วงระยะเวลาของการทดลองสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

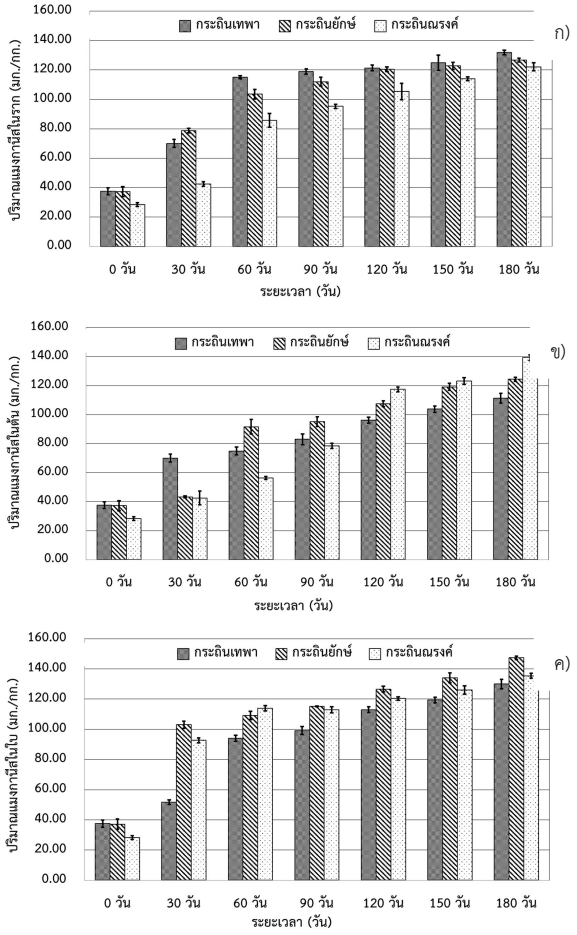
3.1 การสะสมแมงกานีสในส่วนราก พบว่าตลอดระยะเวลาของการทดลอง พืชทั้ง 3 ชนิดมีการสะสมแมงกานีสเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2ก) และมีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) โดยพบว่า กระถินเทพามีความสามารถในการสะสมแมงกานีสในส่วนรากได้มากกว่าพืชทดลองชนิดอื่นมีค่าเท่ากับ 131.87±0.95 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รองลงมา ได้แก่ กระถินยักษ์ และกระถินณรงค์เท่ากับ 126.64±0.78 และ 122.14±1.55 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ที่ระยะเวลาของการทดลอง 180 วัน

3.2 การสะสมแมงกานีสในส่วนลำต้นพบว่า พืชทั้ง 3 ชนิดมีการสะสมแมงกานีสมากขึ้นตามระยะเวลา (รูปที่ 2ข) และมีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) ที่ระยะเวลาของการทดลอง 180 วัน โดยกระถินณรงค์มีความสามารถในการสะสมแมงกานีสไว้ในส่วนลำต้นได้มากที่สุดรองลงมาได้แก่ กระถินยักษ์ และกระถินเทพาเท่ากับ 139.24±1.14, 124.38±0.84 และ 111.25±1.93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ



รูปที่ 1 ปริมาณสารหนูในส่วนต่างๆ ของพืชทดลอง ก) ราก ข) ลำต้น และ ค) ใบ (คิดจากน้ำหนักแห้งของพืช 1 กิโลกรัม)

3.3 การสะสมแมงกานีสในส่วนใบ พบว่า พืชทั้ง 3 ชนิดมีการสะสมแมงกานีสมากขึ้นตามระยะเวลาของการทดลอง (รูปที่ 2ค) และมีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) ที่ 180 วัน โดยกระถินยักษ์สามารถสะสมแมงกานีสในส่วนใบได้มากที่สุด เท่ากับ 147.32±0.68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รองลงมา ได้แก่ กระถินณรงค์ และกระถินเทพา เท่ากับ 135.46±0.91 และ 129.96±1.86 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

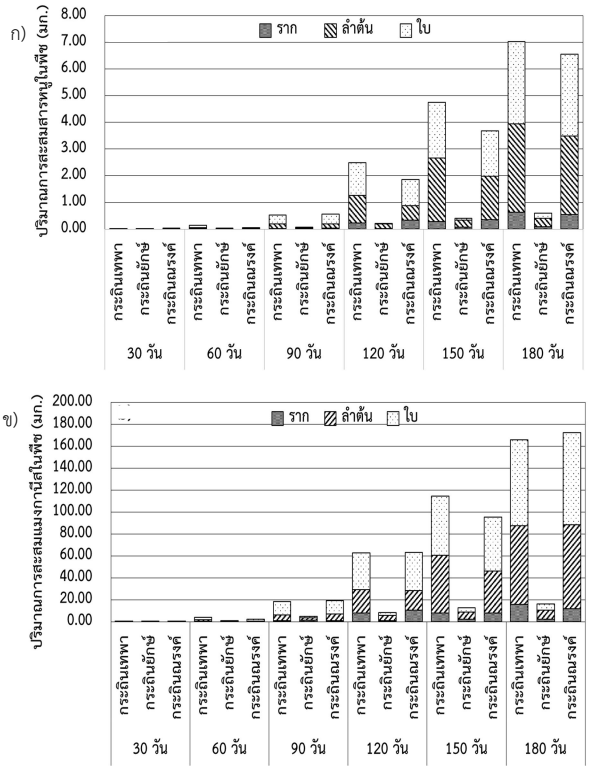


รูปที่ 2 ปริมาณแมงกานีสในส่วนต่างๆของพืชทดลอง ก) ราก ข) ลำต้น และ ค) ใบ (คิดจากน้ำหนักแห้งของพืช 1 กิโลกรัม)

4. ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูและแมงกานีสในพืชทดลองทั้งต้น

4.1 การเจริญเติบโตของพืช พบว่า พืชมีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวที่ 30 วัน ถึง 180 วัน โดยในระยะที่ 180 วัน กระถินเทพามีการเจริญเติบโตด้านน้ำหนักแห้งทั้งต้นมากที่สุด เท่ากับ 1,365.24 กรัม รองลงมาคือ กระถินณรงค์ และกระถินยักษ์ มีค่าเท่ากับ 1,267.88 และ 122.16 กรัม ตามลำดับ ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (p<0.05) โดยกระถินเทพาและกระถินยักษ์ มีน้ำหนักแห้งในส่วนลำต้นมากที่สุด ส่วนกระถินณรงค์มีน้ำหนักแห้งในส่วนใบมากที่สุด ทั้งนี้พืชทดลองทั้ง 3 ชนิดมีน้ำหนักแห้งในส่วนรากน้อยที่สุด

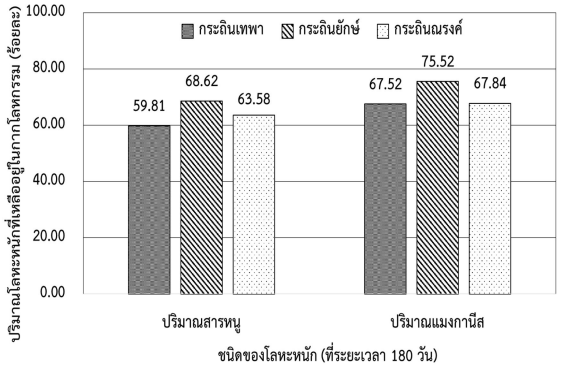
4.2 ปริมาณการสะสมสารหนูและแมงกานีสในพืชทดลองทั้ง 3 ชนิด ที่ระยะเวลา 180 วันของการทดลอง พบว่ากระถินเทพามีความสามารถในการสะสมสารหนูและแมงกานีสสูงที่สุด เท่ากับ 7.03±0.80 (ราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 0.63, 3.31 และ 3.09 มิลลิกรัม ตามลำดับ) และ 166.00±22.16 (ราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 16.02, 71.69และ 78.29 มิลลิกรัม ตามลำดับ) มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งของพืชทั้งต้น ตามลำดับ รองลงมาคือกระถินณรงค์ มีการสะสมสารหนูและแมงกานีสได้เท่ากับ 6.55±1.14 (ราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 0.54, 2.95 และ 3.06 มิลลิกรัม ตามลำดับ) และ 172.75±29.37 (ราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 12.06, 76.42 และ 84.27 มิลลิกรัม ตามลำดับ) มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งของพืชทั้งต้น ตามลำดับสำหรับกระถินยักษ์มีความสามารถในการสะสมสารหนูและแมงกานีสได้เท่ากับ 0.60±0.08 (ราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 0.10,0.31และ 0.19 มิลลิกรัม ตามลำดับ) และ 16.10±2.29 (ราก ลำต้น และใบ เท่ากับ 2.48, 7.97 และ 5.66 มิลลิกรัม ตามลำดับ) มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้งของพืชทั้งต้น ตามลำดับ (รูปที่ 3ก และรูปที่ 3ข)



รูปที่ 3 ปริมาณการสะสมโลหะหนักในพืชทดลองที่ส่วน ราก ลำต้น และใบ (คิดจากน้ำหนักแห้งของพืช)
ก) การสะสมสารหนู และ ข) การสะสมแมงกานีส

5. การสะสมสารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรม

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรมที่ระยะเวลาการทดลอง 180 วัน พบว่า สารหนูและแมงกานีสมีปริมาณลดลงจากช่วงเริ่มต้นของการทดลอง มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ตัวอย่างพืชทดลองทั้ง 3 ชนิด ที่มีความสามารถในการสะสมสารหนูและแมงกานีสเพิ่มขึ้นตามอายุของพืชที่เพิ่มขึ้นหรือเมื่อระยะเวลาของการทดลองเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องจากพืชมีกลไกในการดูดดึงแร่ธาตุ โลหะหนักต่างๆ รวมถึงสารปนเปื้อนอื่นที่อยู่ในดินและน้ำผ่านทางรากไปสะสมไว้ยังส่วนต่างๆ ของพืชได้ อีกทั้งการศึกษาครั้งนี้ยังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยการใช้สับปะรดเป็นตัวชี้วัดความเป็นพิษของโครเมียมที่ปนเปื้อนในดิน พบว่า เมื่ออายุของสับปะรดเพิ่มขึ้นส่งผลให้พืชมีการดูดดึงโครเมียมสู่ส่วนเหนือดินเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณโครเมียมในดินมีค่าลดลง (สุภาพร,2552) ทั้งนี้ผลการสะสมสารหนูและแมงกานีสในพืชศึกษาทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกัน เนื่องจากพืชมีกลไกในการดูดดึงแร่ธาตุต่างๆ ไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ดีไม่เท่ากันซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของโลหะในกากโลหกรรม ความสามารถในการละลายของโลหะ ความทนทานต่อโลหะหนักของพืชและชนิดของพืช (Kufka and Kurus, 1997) จึงทำให้ปริมาณสารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรมลดลงได้ในปริมาณที่ไม่เท่ากันเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 เปอร์เซ็นต์ของสารหนูและแมงกานีสที่เหลืออยู่ในกากโลหกรรม

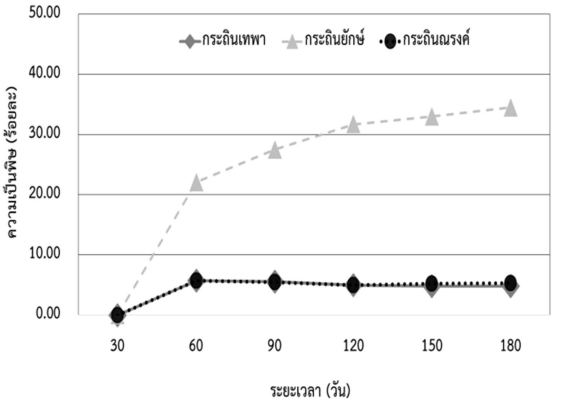
จากรูปที่ 4 ยังแสดงให้เห็นได้ว่าสารหนูและแมงกานีสที่เหลืออยู่ในกากโลหกรรมที่ระยะเวลาการทดลอง 180 วัน มีค่าประมาณ 60-75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปริมาณของสารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรมที่ลดลงหรือสูญหายนั้น มีสาเหตุมาจากพืชทดลองมีการดูดดึงและสะสมไว้ในส่วนต่างๆ อีกทั้งอาจมีผลมาจากปัจจัยทางด้านสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศ ซึ่ง

สถานที่ทดลองมีสภาพพื้นที่แจ้งเปิดโล่ง ประกอบกับช่วงเวลาของการทดลองมีฝนตกในช่วง 2-3 เดือนแรกเป็นบางครั้ง (เป็นช่วงปลายฤดูฝน)ซึ่งอาจทำให้ปริมาณสารหนูและแมงกานีสในกากโลหกรรมถูกชะล้าง หรือไหลลงสู่ด้านล่างของบ่อกักเก็บกากโลหกรรมซึ่งเป็นบ่อขุดได้

6. การแสดงความเป็นพิษของพืช (Phytotoxicity)

ปริมาณสารหนูและแมงกานีสต่อการแสดงความเป็นพิษของพืชได้พิจารณาจากเกณฑ์การให้คะแนนโดยการประเมินจากการสังเกตด้วยสายตา บันทึกข้อมูล และนำไปหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษที่ได้รับจากจำนวนใบของพืช พบว่า ที่ระยะเวลาของการทดลอง 180 วัน กระถินยักษ์มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษที่ได้รับมากที่สุด 34.25 เปอร์เซ็นต์รองลงมาคือกระถินณรงค์และกระถินเทพามีเปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษที่ได้รับเท่ากับ 5.27 และ 4.81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รูปที่ 5)

ทั้งนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า กระถินยักษ์มีการแสดงความเป็นพิษทางใบมากที่สุด โดยในช่วงเริ่มต้นของการทดลอง พบเปอร์เซ็นการแสดงความเป็นพิษของกระถินยักษ์มีอัตราสูงขึ้นอย่างรวดเร็วแล้วเพิ่มขึ้นทีละน้อยในช่วงหลัง สังเกตได้จากความชันของกราฟ (รูปที่ 5) ทั้งนี้ผลการศึกษามีความสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของมวลชีวภาพ โดยพบว่า กระถินยักษ์มีการเพิ่มของมวลชีวภาพต่ำกว่ากระถินเทพาและกระถินณรงค์ในช่วงเริ่มการทดลอง ประกอบกับเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยการทดสอบคลินิกสุขภาพพืช ณ ภาควิชาโรคพืช คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พบว่า ความผิดปกติของใบพืชที่เกิดขึ้นไม่ได้มีสาเหตุมาจากโรคพืชจึงคาดว่าผลของการแสดงความเป็นพิษของพืชเกิดจากสารพิษในกากโลหกรรมนั่นเอง



รูปที่ 5 เปอร์เซ็นต์ความเป็นพิษของพืชทดลอง

7. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ (RGR) และความเป็นพิษของพืช

จากการทดลอง พบว่า อัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของกระถินเทพาและกระถินณรงค์มีค่าลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากปริมาณการสะสมสารหนูและแมงกานีสในพืชเพิ่มมากขึ้น โดยสารหนูไม่ใช่ธาตุที่มีความจำเป็นต่อพืช และอาจทำให้อวัยวะของพืชไม่สามารถทำหน้าที่ตามกระบวนการเมทาบอลิซึมได้ อีกทั้งสารหนูจะเข้าทำลายเซลล์และเนื้อเยื่อคลอโรพลาสต์ของพืช ทำให้พืชลดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง เกิดการลดลงของมวลชีวภาพ เช่น ราก ความสูงของลำต้น การงอก การแตกกิ่งก้านและผลผลิต ส่งผลให้พืชตายได้ในที่สุด ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ทดสอบการสะสมสารหนูในพืชหลายชนิด เช่น ธูปฤาษี บอน พุทธรักษา และกกอียิปต์ ซึ่งผลการทดลอง พบว่า สารหนูทำให้มวลชีวภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัด ใบมีจำนวนลดลง ลำต้นเตี้ยและแคระแกรน มีจำนวนรากและหน่อลดลง (Jomjun, 2009) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Shri et al. (2009) พบว่า สารหนูทำให้ต้นข้าว (*Oryza sativa)* มีเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดลดลง รวมทั้งความยาวราก ลำต้น และมวลชีวภาพลดลง

สำหรับแมงกานีสจัดเป็นธาตุอาหารเสริมของพืช ที่พืชต้องการในปริมาณที่น้อย หากพืชได้รับในปริมาณมากเกินไป พืชอาจแสดงความเป็นพิษได้เช่น ใบมีสีเหลืองหรือสีขาวซีดบริเวณระหว่างเส้นใบ ใบแก่มีรอยด่างเป็นจุด ขอบใบและเส้นใบมีสีขาวซีด เริ่มมีสีน้ำตาลและร่วงหล่นในที่สุด (Sayed et al., 2011) อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของกระถินยักษ์มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน แต่ที่ระยะ 90 วัน พบว่าอัตราการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ของกระถินยักษ์มีค่าเพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากที่ระยะ 90 วัน กระถินยักษ์สามารถดูดดึงและสะสมสารหนูไว้ในส่วนลำต้นลดลงทำให้มีการเจริญเติบโตได้ดีขึ้น ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าปริมาณสารหนูและแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลทำให้ค่าการเจริญเติบโตสัมพัทธ์ลดลง

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณการสะสมสารหนูและแมงกานีสในพืชทดลองทั้ง 3 ชนิด สามารถสรุปได้ว่า เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 180 วัน พืชทดลองที่มีลักษณะของการเจริญเติบโตเป็นไปตามปกติและมีปริมาณมวลชีวภาพสูง ได้แก่ กระถินเทพาและกระถินณรงค์โดยมีปริมาณการสะสมของแมงกานีสสูงสุดอยู่ที่

บริเวณ ใบ>ลำต้น>ราก คิดเป็นอัตราส่วนโดยประมาณ เท่ากับ 6:5:1 และสารหนูมีปริมาณการสะสมสูงสุดอยู่ที่บริเวณ ใบ=ลำต้น> ราก คิดเป็นอัตราส่วนโดยประมาณ เท่ากับ 6:6:1 (คำนวณโดยเทียบจากปริมาณมวลรวมของพืชแห้งในแต่ละส่วน) นอกจากนี้พืชทดลองทั้ง 3 ชนิด ที่มีประสิทธิภาพในการดูดดึงสารหนูได้ดีที่สุด คือ กระถินเทพา เนื่องจากพืชดังกล่าวมีการเจริญเติบโตเร็ว เมื่อนำปริมาณมวลแห้งของพืชทั้งต้นมาคำนวณจึงทำให้มีปริมาณการสะสมสารหนูมากที่สุด อย่างไรก็ตามยังสามารถกล่าวได้ว่ากระถินณรงค์มีประสิทธิภาพในการดูดดึงสารหนูได้ดีเช่นเดียวกับกระถินเทพา สำหรับพืชที่มีประสิทธิภาพในการดูดดึงแมงกานีสได้ดีที่สุด คือ กระถินณรงค์ เนื่องจากมีปริมาณแมงกานีสสะสมในต้นพืชมากที่สุดถึงแม้ว่ามีปริมาณมวลรวมของพืชแห้งน้อยกว่ากระถินเทพา นอกจากนี้กระถินเทพาก็มีความสามารถในการดูดดึงแมงกานีสได้ดีเช่นเดียวกันกับกระถินณรงค์

ดังนั้นกระถินเทพาและกระถินณรงค์จึงเป็นพืชที่มีความสามารถในการนำไปใช้บำบัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนสารหนูและแมงกานีสได้ดีทั้ง 2 ชนิด โดยเฉพาะพื้นที่หลังเสร็จสิ้นจากการประกอบการทำเหมืองแร่แล้ว หากมีการปิดบ่อกักเก็บกากโลหกรรมที่มีการปิดคลุมหน้าดินที่มีความหนามาก การใช้พืชที่มีระบบรากแก้วซึ่งมีความสามารถในการหยั่งรากลงไปได้ลึกเช่นเดียวกับพืชทั้ง 2 ชนิดนี้ ก็อาจเป็นตัวเลือกที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการใช้บำบัดและฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ณัฐฐา คงผล, อโณทัย โกวิทย์วิวัฒน์ และวัชรินทร์ ศิริสารโสภณ นักศึกษา ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร อาหาร และสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ช่วยเหลือในการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง ขอขอบคุณ เอกชา ตนานนท์ชัย และจตุวิทย์ คุปตะสิน ที่ช่วยเหลือในการประมวลและวิเคราะห์ผลของข้อมูล ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) สำหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัย ขอขอบคุณกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนหน่วยปฏิบัติการวิจัยฯ และขอขอบคุณสถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อำนวยความสะดวกและสนับสนุนในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์อันเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. การระวังภัยจากสารเคมีอันตราย [ออนไลน์]. (2554). แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/haz_manual.html#s3 [5 พฤศจิกายน 2558]

กรมป่าไม้. กระถินเทพา [ออนไลน์]. (2556). แหล่งที่มา: http://forestinfo.forest.go.th/pfd/Files/FileEBook/EB1.pdf [23 มกราคม 2560]

เกศ สัตยพงศ์. Arsenic. [ออนไลน์]. (2555) .แหล่งที่มา: http://www.summacheeva.org/index_thaitox_arsenic.html [15 พฤศจิกายน 2558]

ธัญญาภรณ์ สุรภักดี, มูลนิธินโยบายสุขภาวะ. ผลกระทบกรณีเหมืองแร่กับมาตรา 67: โอกาสทองของการเรียนรู้. [ออนไลน์]. (2553). แหล่งที่มา: http://www.publicconsultation.opm.go.th/rubfung67/doc37.pdf [15 พฤศจิกายน 2558]

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. (2558). การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืช (Phytoremediation). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 232 หน้า.

มาลินี สุขแสงพนมรุ้ง. (2544). ต้นไม้กับสารโลหะหนัก. ข่าวสารศูนย์ข้อมูลเทคโนโลยีชีวภาพและความปลอดภัยทางชีวภาพ.

วิวัฒน์ เอกบูระวัฒน์. Manganese. [ออนไลน์]. (2555). แหล่งที่มา: http://www.summacheeva.org/index_thaitox_manganese.html [15 พฤศจิกายน 2558]

สาวิตรี พิสุทธิ์พิเชษฐ์. (2558). พบ "ไม้กระถิน" ทำเยื่อกระดาษให้ผลผลิตสูง ฟอกขาวง่าย. วารสารข่าวมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 12(152).

สุภาพร แป้งทา. (2552). การใช้สับปะรดเป็นตัวชี้วัดความเป็นพิษของโครเมียมและตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน.วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพ.

Brown, J.C., Jolley,V.D. and Lytle, C.M. (1991). Comparative evaluation of iron solubilizing substances (phyto-siderophores) released by oats and corn: Iron-efficient and iron-inefficient plants. Plant and Soil 130: 157-163.

Brown, S.L, Chaney, R.L., Angle, J.S. and Baker, AJM. (1995). Zinc and cadmium uptake by hyper- accumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution. Soil Sci Soc Am J. 59: 125–133.

Garcia, M.A., Alonso, J., Fernandedez, M.I. and Melgar, M.J. (1998). Lead content in edible wild mushroomsin

northwest Spain as indicator of environmental contamination. Archives of Environmental Contamination and Toxicology 34(4): 330–335.

Hoffmann, W.A. and Poorter, P. (2002). Avoiding Bias in Calculations of Relative Growth Rate. Annals of Botany Company. Annals of Botany 80: 37-42.

Jomjun, N. (2009). Phytoremediation of arsenic contaminated submerged soil by aquatic plants. Ph.D. thesis. Chulalongkorn University, Bangkok.

Kufka, Z. and Kuras, M. (1997). Heavy metal in soil contaminated from different sources. In Ecological Issues and Environmental Impact Assessment. Houston, Taxas: Gulf Publishing Company, 261-287.

Sayed, R.M., Mahmood, S. and Maryam, R.A. (2011). General Overview on Manganese (Mn) Importance for Crops Production, Australian Journal of Basic and Applied Sciences 5(9): 1799-1803.

Shri, M. Kumar, S., Chakrabarty, D., Trivedi, P.K., Mallick, S., Misra, P., Shukla, D., Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R.D. and Tuli, R. (2009). Effect of arsenic on growth, oxidative stress, and antioxidant system in rice seedlings. Ecotoxicology and Environmental Safety 72(4): 1102–1110.

Singh, N., Ma, L.Q., Srivastava, M. and Rathinasabapathi, B. (2006). Metabolic adaptations to arsenic induced oxidative stress in *Pteris vittata* L. and *Pteris ensiformis* L. Plant Science Journal. 170: 274–282.

USEPA. (1996). EPA method 3052, Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices.

❑❑❑❑❑