บทความวิจัย (Research Article)

ศักยภาพในการดูดซับและสะสมโลหะหนักของพืชล้มลุกชนิดเด่นบริเวณพื้นที่รอบเหมืองแร่ทองคำ จังหวัดพิจิตร

Potential of Heavy Metal Uptake and Accumulation in Dominant Herbaceous Plants around Gold Mine Areas in Pichit Province

ยศเวท สิริจามร, ปรารถนา เผือกวิไล และณิมนาราห์ อยู่คงแก้ว*

ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

ตำบลพระปฐมเจดีย์ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

Yotsawate Sirichamorn, Prattana Phuekvilai and Nimnara Yookongkaew*

Department of Biology, Faculty of Science, Silpakorn University, Sanam Chandra Palace Campus,

Phra Pathom Chedi, Muang, Nakhonpathom 73000

บทคัดย่อ

การปนเปื้อนของโลหะหนักในดินเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มักพบได้จากการทำเหมืองแร่ พืชหลายชนิดที่เจริญเติบโตในพื้นที่ปนเปื้อนจึงใช้กลไกทางสรีรวิทยาในการปรับตัวเพื่อความอยู่รอด งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพในการดูดซับและสะสมโลหะหนักของพืชล้มลุกในพื้นที่รอบเหมืองแร่ทองคำ อำเภอทับคล้อ จังหวัดพิจิตร โดยเก็บตัวอย่างพืชและดินมาวิเคราะห์ปริมาณแมงกานีส สารหนู ตะกั่ว สังกะสี และแคดเมียมด้วยเทคนิค ICP-OES ผลการวิเคราะห์ดินพบปริมาณสารหนูสูงเกินค่ามาตรฐาน 1.5-17 เท่า โลหะหนักชนิดอื่นมีค่าต่ำหรือสูงกว่ามาตรฐานเล็กน้อย ผลการวิเคราะห์พืช 14 ชนิด สามารถจำแนกพืชตามประเภทของการดูดซับโลหะหนักได้ดังนี้ metal hyperaccumulator ต่อสังกะสี 2 ชนิด คือ หญ้าตีนตุ๊กแก และสะเดาดิน metal excluder ต่อสังกะสี 1 ชนิด คือ ย่านาง metal excluder ต่อแมงกานีส 3 ชนิด คือ หญ้ายาง แมงลักคา และต้อยติ่ง metal indicator ต่อแมงกานีส 2 ชนิด คือ หญ้างวงช้าง และหญ้าตีนตุ๊กแก สารหนูเป็นธาตุที่มีการปนเปื้อนในดินมากที่สุด แต่ไม่พบพืชที่มีแนวโน้มจะนำมาใช้บำบัดสารหนูออกจากดินได้ อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยนี้จะเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาวิจัยถึงศักยภาพของพืชในการดูดซับและสะสมธาตุโลหะหนัก เพื่อนำความรู้มาประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ทางด้านการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโดยใช้พืชต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ : การสะสมโลหะหนัก; พืชล้มลุก; เหมืองแร่ทองคำ

***ผู้รับผิดชอบบทความ :** nimnara@gmail.com

DOI 10.14456/tstj.2017.11

Abstract

Heavy metals and metalloids contamination in soil is one of the serious environmental problems usually found in mining areas. Plant species growing on these contaminated soils have to adapt themselves physiologically to survive. This research aims to search for the potential of heavy metal uptake and accumulation in dominant herbaceous plants growing naturally around gold mine areas of Tab Khlo district, Pichit province. Plants and soils were collected and subjected to metal analysis using ICP-OES technique. The results showed that arsenic in soils exceeded the standard level 1.5-17 times. However, the concentrations of other metals were lower or slightly higher than the restricted values. Fourteen dominant herbaceous plant species were sampled. *Coldenia procambens* and *Glinus oppositifolius* were classified as Zinc hyperaccumulator and *Tiliacora triandra* was classified as zinc excluder. Manganese excluders consisted of *Euphorbia heterophylla*, *Hyptis suaveolens* and *Ruellia tuberosa* while *Heliotropium indicum* and *Coldenia procambens* were recognized as manganese indicators. Arsenic was the most problematic metal contamination in this area but none of the collected plants was qualified for arsenic phytoremediation. Nevertheless, results obtained from this study can be used as a guideline for research or applications related to phytoremediation in near future.

Keywords: metal accumulation; herbaceous plants; gold mine

1. บทนำ

การปนเปื้อนของโลหะหนักในดินส่งผลกระทบเชิงลบโดยตรงต่อความหลากหลายทางชีวภาพของพืชในบริเวณที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก พบว่าพืชหลายชนิดจะสูญหายไปจากพื้นที่ เนื่องจากไม่สามารถทนความเป็นพิษได้ [1] อย่างไรก็ตาม มีพืชอีกหลายชนิดที่มีกลไกทางสรีรวิทยาบางประการทำให้สามารถอยู่รอดและเจริญเติบโตได้ในพื้นที่ดังกล่าว [2-4] Baker และ Walker [5] ได้จำแนกพืชที่สามารถเจริญในพื้นที่ปนเปื้อนพิษของโลหะหนัก โดยมีเกณฑ์พิจารณา คือ ปริมาณโลหะหนักที่สะสม ความสามารถในการดูดซับและลำเลียงโลหะหนัก ตลอดจนอวัยวะที่ใช้เป็นแหล่งเก็บสะสมโลหะหนักนั้น ๆ ทำให้สามารถจำแนกพืชออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ (1) metal excluder คือ พืชที่สะสมโลหะหนักไว้ในรากแต่ไม่มีการลำเลียงไปยังส่วนอื่น ๆ (2) metal indicator คือ พืชที่นอกจากจะดูดโลหะหนักทางรากแล้ว ยังมีการลำเลียงไปสะสมไว้ยังส่วนต่าง ๆ โดยเฉพาะส่วนเหนือพื้นดิน ได้แก่ ลำต้นหรือใบ โดยความเข้มข้นของโลหะหนักจะมีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณที่ตรวจพบในดิน ดังนั้นจึงสามารถใช้พืชกลุ่มดังกล่าวเป็นดัชนีชี้วัดพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักและปริมาณโลหะหนักในดินได้ด้วย และ (3) metal accumulator/hyper accumulator คือ พืชที่มีการดูดซึมโลหะและมีการลำเลียงไปสะสมไว้ยังส่วนต่าง ๆ เช่นเดียวกับ metal indicator หากแต่ต่างกันตรงที่ปริมาณโลหะหนักที่สะสมในลำต้นจะมีความเข้มข้นสูงกว่าในดินที่พืชเจริญอยู่ และสูงมากพอที่จะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชชนิดใกล้เคียงที่ไม่ได้เป็น hyper accumulator ซึ่งพืชในกลุ่มสุดท้ายนี้ได้รับความสนใจจากนักสิ่งแวดล้อมในฐานะเป็นพืชที่

มีศักยภาพในการใช้บำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าพืชดอกที่มีคุณสมบัติเป็น metal accumulator/hyper accumulator นี้ มีกว่า 500 ชนิด จากหลากหลายวงศ์ ทั้งที่เป็นพืชไร้เมล็ดและพืชดอกทั้งใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่ [6,7]

การทำเหมืองแร่ทองคำอาจก่อให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมโดยรอบทั้งดิน น้ำ และอากาศ โดยมีการตรวจพบการปนเปื้อนของธาตุชนิดต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม เช่น สังกะสี ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว โครเมียม แคดเมียม สารหนู แมงกานีส [8,9] ซึ่งการสะสมของธาตุเหล่านี้ในปริมาณสูงจะก่อให้เกิดผลกระทบกับสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศในแง่มุมต่าง ๆ วิธีการบำบัดความเป็นพิษจากการปนเปื้อนของธาตุดังกล่าวที่ประหยัดและมีประสิทธิภาพอย่างหนึ่งคือการใช้พืช (phytoremediation) โดยอาศัยความสามารถในการดูดซับสารพิษจากดินหรือน้ำของพืช และคุณสมบัติของพืชในการทนทานต่อความเป็นพิษนั้น ๆ [10] ซึ่งพืชที่นำมาใช้ในกระบวนการบำบัดดังกล่าว มีอยู่หลายชนิดทั้งที่เป็นพืชล้มลุกจนถึงไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ [7] อย่างไรก็ตาม พบว่าพืชที่นำมาใช้ในการบำบัดส่วนใหญ่มีคุณสมบัติเป็นพืชล้มลุกอายุสั้น และไม่ใช่พืชรับประทานหรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์สมุนไพร เนื่องจากพืชดังกล่าวเติบโตได้รวดเร็ว สามารถเก็บเกี่ยวไปทำลายได้ง่าย และมั่นใจได้ว่าสารพิษที่พืชดูดซับไปจะไม่กลับเข้าสู่ร่างกายคนผ่านการรับประทานหรือบริโภคผลิตภัณฑ์จากพืชบำบัด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาศักยภาพในการดูดซับและสะสมโลหะหนักของพืชล้มลุกชนิดเด่นในพื้นที่บริเวณรอบเหมืองแร่ทองคำ ภายใต้สมมติฐานว่าพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีจนเป็นชนิดเด่นในพื้นที่ที่คาดว่าว่ามีการ ปนเปื้อนโลหะหนักนั้น น่าจะมีคุณสมบัติทนทานต่อพิษของโลหะหนักด้วยกลไกอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยการศึกษานี้เน้นกลุ่มพืชล้มลุกที่ไม่ใช่พืชอาหาร จากนั้นจึงจำแนกประเภทของพืชที่เก็บมาว่าเป็นกลุ่มใด (metal excluder, metal indicator หรือ metal hyper accumulator) โดยความรู้จากงานวิจัยดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์เพื่อประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การบำบัดพื้นฟูสภาพดินโดยการลดปริมาณของโลหะหนักในดินบริเวณเหมืองแร่ ใช้บ่งชี้สภาพแวดล้อมที่มีการปนเปื้อน หรือนำใช้ปรับปรุงพันธุ์พืชให้สามารถเพาะปลูกได้ในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การสำรวจพันธุ์พืชและการเก็บตัวอย่าง

สำรวจพันธุ์พืชบริเวณริมทางสาธารณะรอบบ่อเก็บกากแร่ที่ 1 และบ่อเก็บกากแร่ที่ 2 ของเหมืองแร่ทองคำ บริเวณหมู่ 3 และหมู่ 8 ตำบลเขาเจ็ดลูก อำเภอทับคล้อ จังหวัดพิจิตร ในช่วงเดือนมิถุนายน ปี พ.ศ. 2558 จากนั้นเก็บตัวอย่างพืชและดิน จำนวน 9 ตำแหน่ง และบันทึกพิกัดทุกตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง (รูปที่ 1 และตารางที่ 1) โดยเลือกเก็บเฉพาะกลุ่มพืชล้มลุกชนิดเด่น (พบจำนวนมากกว่า 50 ต้นในหนึ่งจุดเก็บตัวอย่าง หรือเจริญครอบคลุมจุดเก็บตัวอย่างมากกว่า 30 % ของพื้นที่) พืชตัวอย่างแต่ละชนิดได้รับการตรวจสอบหาชื่อวิทยาศาสตร์ที่ถูกต้องโดยใช้เอกสารทางพฤกษอนุกรมวิธานและฐานข้อมูลวัชพืชที่พบในประเทศไทยและประเทศเพื่อนบ้าน ทั้งที่เป็นสิ่งตีพิมพ์และสื่อออนไลน์ ในการศึกษาครั้งนี้ได้เก็บตัวอย่างพืชล้มลุกจำนวน 14 ชนิด รวม 25 ตัวอย่าง (ตารางที่ 1) โดยการเก็บตัวอย่างจะเก็บทั้งส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดิน จำนวนอย่างน้อยตัวอย่างละ 10 ต้นต่อตำแหน่ง แล้วนำตัวอย่างทั้ง 10 ต้นมารวมกันเพื่อเป็นตัวแทนของพืชแต่ละชนิดในตำแหน่งนั้น สำหรับการเก็บตัวอย่างดิน จะเก็บตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างพืช โดยสุ่มตัวอย่างดิน 3 จุด ในบริเวณนั้น

รวมเป็นถุงเดียวกัน เพื่อใช้เป็นตัวแทนดินของบริเวณดังกล่าวทั้ง 9 ตำแหน่ง

2.2 การเตรียมตัวอย่างเพื่อการตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

นำตัวอย่างพืช มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและเศษดินออก แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 3 ครั้ง จากนั้นตัดแยกส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินออกจากกัน นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-5 วัน สำหรับตัวอย่างดินนำไปอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-5 วัน เช่นเดียวกับตัวอย่างพืช

รูปที่ 1 แผนที่แสดงตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง โดย △ แสดงตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง และหมายเลขแสดงจุดที่เก็บตัวอย่างตามตารางที่ 1

2.3 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

นำตัวอย่างพืชและตัวอย่างดินจากข้อ 2.2 ส่งตรวจวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเทคนิค ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy) เพื่อตรวจหาปริมาณสารหนู (As) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร โดยใช้ปริมาณตัวอย่างพืชแต่ละส่วน และตัวอย่างดินปริมาณ 1-5 กรัมน้ำหนักแห้ง สำหรับตัวอย่างพืช ใช้วิธีการเผาที่ 700 องศาเซลเซียส (dry ashing) แล้วนำเถ้าไปละลายด้วยกรดไนตริก ส่วนตัวอย่างดิน ใช้วิธี acid extraction ในการวิเคราะห์สารหนูและตะกั่ว และใช้วิธี acid digestion ในการวิเคราะห์แมงกานีส สังกะสี และแคดเมียม ก่อนนำตัวอย่างทั้งหมดไปตรวจวัดปริมาณด้วยเครื่อง ICP-OES ต่อไป

2.4 การจำแนกประเภทของพืชตามการสะสมปริมาณโลหะหนัก

นำปริมาณโลหะหนักที่ได้จากข้อ 2.3 มาวิเคราะห์ เพื่อจำแนกประเภทของพืชว่าเป็น metal hyperaccumulator, metal excluder หรือ metal indicator โดยคำนวณค่า translocation factor (TF) ค่า bioaccumulation factor (BAF) และค่า bio-concentration factor (BCF) จากสูตรดังนี้

TF = Cshoot/Croot

BAF = Cshoot/Csoil

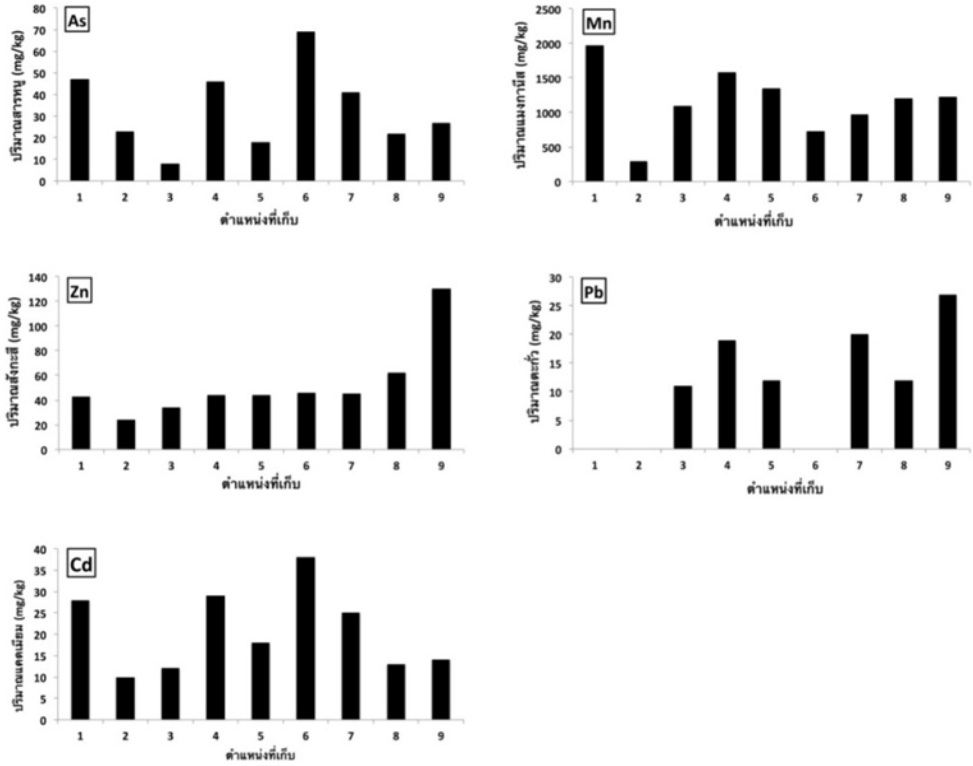
BCF = Croot/Csoil

เมื่อ Cshoot คือ ปริมาณโลหะหนักจากส่วนเหนือดินของพืช (mg/kg DW); Croot คือ ปริมาณโลหะหนักจากส่วนใต้ดินของพืช (mg/kg DW); Csoil คือ ปริมาณโลหะหนักในดิน (mg/kg DW)

ตารางที่ 1 จุดเก็บตัวอย่าง พิกัดที่เก็บตัวอย่าง และชนิดพืช โดยเลขด้านหลังชื่อพืชแสดงหมายเลขตัวอย่าง

จุดเก็บตัวอย่าง	พิกัดที่เก็บตัวอย่าง		ชื่อพืช	ชื่อวิทยาศาสตร์
	ละติจูด	ลองติจูด		
1	16.278336	100.649956	สาบเสือ 1	*Chromolaena ordorata* (L.) R.M. King & H.Rob
			ย่านาง 1	*Tiliacora triandra* (Colebr.) Diels
			ย่านาง 2	*Tiliacora triandra* (Colebr.) Diels
			สาบเสือ 2	*Chromolaena ordorata* (L.) R.M. King & H.Rob
2	16.276687	100.644147	หญ้างวงช้าง 1	*Heliotropium indicum* L.
			หญ้าตีนตุ๊กแก 1	*Coldenia procumbens* L.
3	16.277088	100.629608	ผักเสี้ยนผี 1	*Cleome viscosa* L.
			หญ้ายาง 1	*Euphorbia heterophylla* L.
			สะเดาดิน	*Glinus oppositifolius* (L.) Aug.DC.
			หญ้าตีนตุ๊กแก 2	*Coldenia procumbens* L.
			หญ้างวงช้าง 2	*Heliotropium indicum* L.
4	16.276976	100.629123	ผักเสี้ยนผี 2	*Cleome viscosa* L.
			สาบแร้งสาบกา 1	*Ageratum conyzoides* L.
			หญ้าขจรจบ 1	*Pennisetum pedicellatum* Trin.
			สาบแร้งสาบกา 2	*Ageratum conyzoides* L.
			บานไม่รู้โรยป่า 1	*Gomphrena celosioides* Mart.
5	16.276547	100.627508	บานไม่รู้โรยป่า 2	*Gomphrena celosioides* Mart.
			หญ้านกสีชมพู 1	*Echinochloa colona* (L.) Link
6	16.279056	100.625992	หญ้าชันกาด 1	*Panicum repens* L.
			หญ้าชันกาด 2	*Panicum repens* L.
7	16.283598	100.626803	หญ้าขจรจบ 2	*Pennisetum polystachyon* (L.) Schult.
			แมงลักคา 1	*Hyptis suaveolens* (L.) Poit
			แมงลักคา 2	*Hyptis suaveolens* (L.) Poit
8	16.296781	100.633511	ต้อยติ่ง 1	*Ruellia tuberosa* L.
9	16.298587	100.637451	ต้อยติ่ง 2	*Ruellia tuberosa* L.

หากพืชที่วิเคราะห์ มีค่า TF, BAF และ BCF มากกว่า 1 จะจำแนกพืชนั้นว่าเป็น metal hyperaccumulator และหากมีค่า TF น้อยกว่า 1 และมีปริมาณโลหะหนักในรากสูง จะจำแนกพืชนั้นว่าเป็น metal excluder ส่วนพืชที่เป็น metal indicator จะต้องมีปริมาณโลหะหนักที่สะสมในส่วนเหนือดินของพืช แปรผันตามปริมาณโลหะในดินที่ตำแหน่งนั้น ๆ [7,11]



รูปที่ 2 ปริมาณ As, Mn, Zn, Pb และ Cd ในดินจากตำแหน่งเก็บตัวอย่าง 9 ตำแหน่ง

3. ผลการวิจัย

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในดิน

เก็บตัวอย่างดินทั้ง 9 ตำแหน่ง มาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก 5 ชนิด คือ สารหนู (As) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) ตามรูปที่ 2 พบว่าดินทั้ง 9 ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง มีปริมาณสารหนูสูงเกินค่ามาตรฐานตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) ซึ่งกำหนดไว้ที่ 3.9 mg/kg สำหรับพื้นที่สำหรับอยู่อาศัยและเกษตรกรรม โดยแต่ละพื้นที่เก็บตัวอย่างมีปริมาณสารหนูแตกต่างกัน ตั้งแต่ 8 mg/kg ที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 3 จนสูงสุดที่ 69 mg/kg ที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 6 (รูปที่ 2-As) สำหรับผลการวิเคราะห์ปริมาณแมงกานีส พบว่าตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 1 มีปริมาณแมงกานีสสูงที่สุด คือ 1,976 mg/kg ซึ่งเกินค่ามาตรฐาน (1,800 mg/kg) ในขณะที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างอื่น ๆ ยังคงมีปริมาณแมงกานีสไม่เกินค่ามาตรฐาน โดยส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 1,350 mg/kg (ควอไทล์ที่ 3) ยกเว้นที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 5 มีปริมาณแมงกานีสสูงกว่าค่าควอไทล์ที่ 3 คือ 1,578

mg/kg (รูปที่ 2-Mn) ผลการวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีในพื้นที่เก็บตัวอย่าง พบว่าทุกตำแหน่งมีปริมาณสังกะสีอยู่ระหว่าง 24-130 mg/kg ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐาน* (300 mg/kg) โดยตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 9 มีปริมาณสังกะสีมากที่สุด ซึ่งยังต่ำกว่าค่าควอไทล์ที่ 2 (150 mg/kg) (รูปที่ 2-Zn) สำหรับผลการวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วในดินพบว่าทุกตำแหน่งเก็บตัวอย่าง มีปริมาณตะกั่วต่ำกว่าค่ามาตรฐานค่อนข้างมาก (400 mg/kg) โดยตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 มีปริมาณต่ำจนไม่สามารถวิเคราะห์ได้ (รูปที่ 2-Pb) จากการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียม พบว่าที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 6 มีปริมาณเกินค่ามาตรฐาน (37 mg/kg) เพียงเล็กน้อย ในขณะที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่างอื่น ๆ มีปริมาณต่ำกว่าค่ามาตรฐาน โดยมี 2 ตำแหน่ง คือตำแหน่งเก็บตัวอย่างที่ 1 และ 4 ที่มีปริมาณแคดเมียมสูงกว่าควอไทล์ที่ 3 (27.75 mg/kg) (รูปที่ 2-Cd)

สำหรับค่ามาตรฐานสังกะสีในดิน ใช้เกณฑ์ตามค่ามาตรฐานของ European Union Standard (EU) เนื่องจากไม่พบรายงานเกณฑ์มาตรฐานสังกะสีในดินสำหรับพื้นที่ที่ใช้อยู่อาศัยและเกษตรกรรมตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547)

ตารางที่ 2 ค่า translocation factor (TF), bioaccumulation factor (BAF) และ bio-concentration factor (BCF) ในพืชตัวอย่าง โดยเลขด้านหลังชื่อพืชแสดงหมายเลขตัวอย่าง

ตำแหน่งที่เก็บ	พืช	Mn			Zn		
		TF	BAF	BCF	TF	BAF	BCF
1	สาบเสือ 1	1.43*	0.05	0.03	2.11*	0.44	0.21
	ย่านาง 1	3.02*	0.07	0.02	0.60	0.28	0.47
	ย่านาง 2	2.26*	0.07	0.03	0.64	0.33	0.51
	สาบเสือ 2	2.23*	0.14	0.06	2.18*	0.56	0.26
2	หญ้างวงช้าง 1	5.50*	0.53	0.10	2.57*	1.50*	0.58
	หญ้าตีนตุ๊กแก 1	3.38*	0.70	0.21	1.48*	2.71*	1.83*
3	ผักเสี้ยนผี 1	1.66*	0.07	0.04	1.38*	0.65	0.47
	หญ้ายาง	0.60	0.14	0.23	1.35*	0.68	0.50
	สะเดาดิน	3.01*	0.64	0.21	1.43*	2.06*	1.44*
	หญ้าตีนตุ๊กแก 2	2.09*	0.26	0.13	0.92	1.03*	1.12*
	หญ้างวงช้าง 2	3.27*	0.21	0.07	1.50*	0.97	0.65
4	ผักเสี้ยนผี 2	3.15*	0.08	0.02	1.38*	0.41	0.30
	สาบแร้งสาบกา 1	1.82*	0.09	0.05	0.84	0.36	0.43
	หญ้าขจรจบ 1	0.99	0.11	0.11	0.61	0.45	0.75
	สาบแร้งสาบกา 2	1.79*	0.16	0.09	1.38*	0.50	0.36
	บานไม่รู้โรยป่า 1	1.30*	0.05	0.04	3.27*	0.82	0.25
5	บานไม่รู้โรยป่า 2	1.64*	0.28	0.17	2.29*	1.45*	0.64
	หญ้านกสีชมพู 1	1.38*	0.14	0.10	1.35*	0.80	0.59
6	หญ้าซันกาด 1	2.05*	0.10	0.05	1.84	0.76	0.41
	หญ้าซันกาด 2	1.96*	0.13	0.07	0.91	2.30	2.52
7	หญ้าขจรจบ 2	1.22*	0.18	0.14	1.21	0.76	0.62
	แมงลักคา 1	0.81	0.17	0.21	2.19	0.78	0.36
	แมงลักคา 2	0.82	0.11	0.13	2.46	0.71	0.29
8	ต้อยติ่ง 1	0.88	0.03	0.04	1.86	0.42	0.23
9	ต้อยติ่ง 2	0.36	0.01	0.04	1.43	0.23	0.16

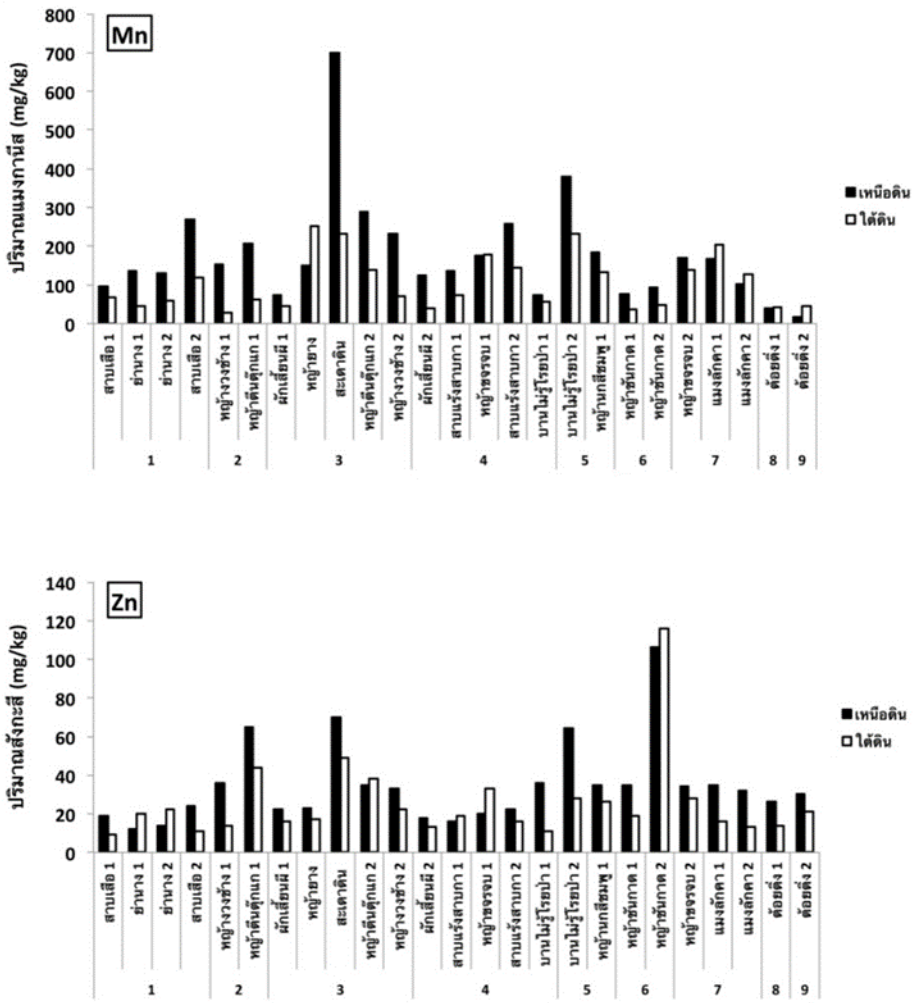
*แสดงค่า TF, BAF และ BCF ที่มากกว่า 1

3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่สะสมในพืช

การส่งตัวอย่างพืชทั้งส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดิน เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารหนู (As) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) พบว่า สามารถตรวจวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักได้เพียง 2 ชนิด คือ แมงกานีส (Mn) และสังกะสี (Zn) เท่านั้น เนื่องจากโลหะหนักชนิดอื่น มีปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถวิเคราะห์ได้ โดยผลจากการวิเคราะห์ปริมาณแมงกานีสในพืชล้มลุกที่เก็บตัวอย่างมาจำนวน 14 ชนิด พบว่ามีการสะสมแมงกานีสอยู่ในส่วนเหนือดินมากกว่าส่วนใต้ดิน ยกเว้นหญ้ายาง แมงลักคา และต้อยติ่ง ซึ่งมีการสะสมแมงกานีสในส่วนใต้ดินมากกว่าส่วนเหนือดิน (รูปที่ 3) ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่า TF ของพืชทั้ง 3 ชนิด น้อยกว่า 1 และพบว่ามีแมงกานีสสะสมในส่วนใต้ดินในปริมาณสูง จึงจัดพืชทั้ง 3 ชนิด ว่าเป็น metal excluder ต่อแมงกานีส (ตารางที่ 2 และ 3) และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณแมงกานีสในหญ้างวงช้างและหญ้าตีนตุ๊กแก พบว่าพืชทั้ง 2 ชนิด นี้มีการสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือดินสูงกว่าส่วนใต้ดินค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับพืชชนิดอื่น จึงส่งผลให้มีค่า TF โดยเฉลี่ยสูงกว่าพืชหลายชนิดตามไปด้วย อีกทั้งยังพบว่าปริมาณแมงกานีสที่พบในส่วนเหนือดินของพืชทั้ง 2 ชนิด ยังแปรผันตามปริมาณแมงกานีสในดินบริเวณที่เก็บตัวอย่าง โดยปริมาณแมงกานีสในส่วนเหนือดินของหญ้างวงช้างและหญ้าตีนตุ๊กแกตัวอย่างที่ 1 ซึ่งเก็บจากจุดเก็บตัวอย่างตำแหน่งที่ 2 มีปริมาณต่ำกว่าในหญ้างวงช้างและหญ้าตีนตุ๊กแกตัวอย่างที่ 2 ซึ่งเก็บจากจุดเก็บตัวอย่างตำแหน่งที่ 3 โดยจะเห็นว่าปริมาณแมงกานีสในพืชสอดคล้องกับปริมาณแมงกานีสในดิน (ซึ่งตำแหน่งที่ 2 มีค่าต่ำกว่าตำแหน่งที่ 3) (รูปที่ 2) ดังนั้นจึงจัดพืชทั้ง 2 ชนิด ดังกล่าวเป็น metal indicator ต่อแมงกานีส (ตารางที่ 2 และ 3) ทั้งนี้ ไม่พบพืชที่มีคุณสมบัติเป็น metal hyperaccumulator ต่อแมงกานีสเลย อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ปริมาณสังกะสี พบว่าหญ้าตีนตุ๊กแกและสะเดาดินมีคุณสมบัติเป็น metal hyperaccumulator (สังกะสี) เนื่องจากมีค่า TF, BAF และ BCF เฉลี่ยมากกว่า 1 (ตารางที่ 2 และ 3) อีกทั้งพืช 2 ชนิด ดังกล่าวยังมีปริมาณการสะสมสังกะสีทั้งในส่วนเหนือดินและส่วนใต้ดินในปริมาณค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่น ๆ (รูปที่ 3) ส่วนย่านางถูกจัดเป็น metal excluder ต่อสังกะสี เนื่องจากมีค่า TF มากกว่า 1 และมีการสะสมสังกะสีในส่วนใต้ดินในปริมาณสูง เมื่อเทียบกับส่วนเหนือดิน สำหรับพืชอื่น ๆ อีก 7 ชนิด คือ สาบเสือ ผักเสี้ยนผี บานไม่รู้โรยป่า สาบแร้งสาบกา หญ้าขจรจบ หญ้านกสีชมพู และหญ้าชันกาดไม่สามารถจัดจำแนกประเภทตามการสะสมปริมาณโลหะหนัก (แมงกานีสและสังกะสี) ได้

4. วิจารณ์

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับศักยภาพของพืชต่อการดูดซับและสะสมโลหะหนักมีหลายประการ ทั้งปัจจัยภายนอกที่มาจากลักษณะทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของดินที่ปนเปื้อนที่พืชขึ้นอยู่ เช่น เนื้อดิน ความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณจุลินทรีย์ในดิน [12,13] และปัจจัยจากภายในพืชเอง ซึ่งพืชแต่ละชนิดก็มีการปรับตัวเพื่อให้อยู่รอดในสภาวะปนเปื้อนเหล่านั้นแตกต่างกัน บางชนิดมีการสะสมไว้ในต้น บางชนิดมีการกำจัดออกด้วยวิธีการต่า งๆ ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าธาตุที่เป็นปัญหาหลักที่พบการปนเปื้อนสูงในดินบริเวณรอบเหมืองทองคำของอำเภอทับคล้อ จังหวัดพิจิตร คือ สารหนู (As) ซึ่งธาตุดังกล่าวจัดเป็นสิ่งปนเปื้อนในสินแร่โลหะ สารหนูที่ตรวจพบในปริมาณสูงนี้สอดคล้องกับรายงานของกรมพัฒนาที่ดิน (204.9-387.5 mg/kg) [14] ทว่าสาเหตุของการปนเปื้อนนี้ยังไม่



รูปที่ 3 ปริมาณโลหะหนักในพืชตัวอย่างที่เก็บจากตำแหน่งเก็บตัวอย่างดิน 9 ตำแหน่ง โดยตัวเลขใต้แกนนอนแสดงตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง และเลขด้านหลังชื่อพืชแสดงหมายเลขตัวอย่าง

ชัดเจนว่ามาจากการทำเหมืองแร่ทองคำหรือไม่ สารหนูเป็นธาตุที่อาจก่อความเป็นพิษให้กับพืช โดยในพืชล้มลุกชนิดเด่นที่เลือกมาศึกษาพบว่ามีการสะสมสารหนูในปริมาณต่ำเกินกว่าความสามารถของเครื่องมือจะวิเคราะห์ได้ อย่างไรก็ตาม ได้มีรายงานถึงการพบพืชที่มีการสะสมของสารหนูในส่วนต่าง ๆ เช่น ข้าว [15,16] และมีพืชบางชนิดที่สามารถทนทานต่อพิษของสารหนูหรือมีการสะสมสารหนูในปริมาณสูง (arsenic hyper-accumulator) ทั้งที่เป็นพืชดอก เช่น *Holcus lanatus* L. [17] และ *Silene paradoxa* L. [18] รวมถึงพวกเฟิร์นอย่างกูดหมาก (*Pteris vittata* L.) [19] และเฟิร์นท้องใบเงิน (*Pityrogramma calomelanos* L.) [20] โดยการสำรวจในพื้นที่ศึกษาพบกูดหมากเจริญเติบโตอยู่เช่นกันแต่มีในจำนวนน้อยมาก ไม่อาจนับเป็นพืชชนิดเด่นได้ จึงไม่ได้เก็บตัวอย่างเพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ ทั้งนี้เคยมีรายงานว่าพืชนำเข้าสารหนู

ตารางที่ 3 จำแนกชนิดของพืชตามประเภทของการสะสมโลหะหนัก

ประเภทของการสะสมโลหะหนัก	ชนิดโลหะหนัก	ชนิดพืช
Metal hyperaccumulator	Mn	-
	Zn	หญ้าตีนตุ๊กแก สะเดาดิน
Metal excluder	Mn	หญ้ายาง แมงลักคา ต้อยติ่ง
	Zn	ย่านาง
Metal indicator	Mn	หญ้างวงช้าง หญ้าตีนตุ๊กแก
	Zn	-

โดยโปรตีนกลุ่ม phosphate transporter ชนิดต่าง ๆ ที่อยู่บนเยื่อหุ้มเซลล์ของราก ดังนั้นในดินที่มีปริมาณฟอสเฟตที่สูงก็จะขัดขวางการนำเข้าสารหนูในรูปเกลืออาร์ซิเนต (arsenate) ด้วย ในพืชที่ทนทานต่อสารหนูหลายชนิดจึงมีกลไกในการลดการทำงานของโปรตีนในกลุ่มนี้ลง แต่ในสิ่งแวดล้อมที่มีปริมาณออกซิเจนน้อย เช่น ในนาข้าวที่น้ำท่วมขัง สารหนูจะอยู่ในรูปเกลืออาร์เซไนต์ (arsenite) ซึ่งดูดซึมได้ง่ายกว่ารูปเกลืออาร์ซิเนต (arsenate) ที่มักจะจับตัวแน่นกับสารประกอบออกไซด์ในดิน [16] จากการสังเกตในสภาพแวดล้อมบริเวณรอบเหมืองทอง จังหวัดพิจิตร ณ ช่วงเวลาที่เก็บตัวอย่าง พื้นที่ค่อนข้างแห้งแล้งและดินมีความพรุนค่อนข้างสูง สารหนูจึงอาจอยู่ในรูปเกลืออาร์ซิเนตซึ่งพืชนำไปใช้ได้ยากกว่า และอาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ตรวจไม่พบปริมาณสารหนูในตัวอย่างพืชเลย ในการวิเคราะห์ดินครั้งนี้ผู้วิจัยไม่ได้วิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัส หรือตรวจหาค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน จึงเป็นการยากที่จะสรุปสาเหตุของการตรวจไม่พบการสะสมของสารหนูในพืช อีกทั้งเทคนิค ICP-OES ที่ใช้วิเคราะห์อาจมีความไว (sensitivity) ไม่มากพอที่จะตรวจจับสารหนูในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับเทคนิค ICP-MS ซึ่งเป็นที่ยอมรับว่าเป็นเทคนิคที่มีความไวสูงในการวิเคราะห์ธาตุโลหะ

แคดเมียม (Cd) และแมงกานีส (Mn) เป็นโลหะหนักที่พบปัญหาการปนเปื้อนในบริเวณศึกษาเช่นกัน เช่นเดียวกับสารหนู แคดเมียมไม่ใช่ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช ในขณะที่แมงกานีสเป็นจุลสาร อาหาร (micronutrient) ของพืช แคดเมียมสามารถปนเปื้อนได้ทั้งในดิน น้ำ และฟุ้งกระจายในลักษณะอนุภาคของฝุ่นละอองในอากาศ โดยพบว่าการดูดซึมแคดเมียมในพืชจะสูงขึ้นในดินที่เป็นดินเค็มจากเกลือคลอไรด์ ดินที่ขาดธาตุสังกะสีและดินที่เป็นกรด [21] แม้ว่าจากการวิเคราะห์ดินในครั้งนี้พบว่ามีปริมาณสังกะสี (Zn) ในระดับที่ไม่เกินค่ามาตรฐาน แต่ก็ไม่ได้ทำให้พืชมีการสะสมแคดเมียมมากยิ่งขึ้นเนื่องจากปริมาณแคดเมียมในเนื้อเยื่อพืชมีค่าต่ำเกินกว่าระดับที่เครื่องมือจะตรวจพบ ถึงแม้จะเคยมีรายงานว่าสาบเสือเป็น Cd hyperaccumulator [22] แต่ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ก็ยังตรวจไม่พบแคดเมียมในพืชดังกล่าวหรือในพืชล้มลุกในวงศ์เดียวกัน (Asteraceae) อย่างสาบแร้งสาบกา สำหรับแมงกานีสที่เป็นธาตุอาหารจำเป็นที่พืชต้องการในปริมาณน้อย พบว่ามีการปนเปื้อนที่สูงมากในดิน 1

ตำแหน่ง โดยมีพืชล้มลุก 3 ชนิด คือ หญ้ายาง แมงลักคา และต้อยติ่ง ที่ถูกจำแนกเป็น Mn excluder เนื่องจากมีการสะสมแมงกานีสในส่วนใต้ดินมากกว่าที่จะลำเลียงไปยังส่วนเหนือดิน และพืชอีก 2 ชนิด คือ หญ้างวงช้างและหญ้าตีนตุ๊กแก ที่มีคุณสมบัติเป็น Mn indicator คือมีการลำเลียงแมงกานีสไปสะสมยังส่วนเหนือดินในปริมาณที่สอดคล้องกับปริมาณที่พบในดิน พืชล้มลุกทั้ง 5 ชนิด เป็นพืชดอก ใบเลี้ยงคู่ ที่มีระบบรากแบบรากแก้ว โดยต้อยติ่ง รากจะเปลี่ยนไปทำหน้าที่เป็นรากสะสมอาหารด้วย จากการศึกษาที่ผ่านมาทั่วโลกพบพืชที่เป็น Mn hyperaccumulator ประมาณ 12 ชนิด โดยจะมีค่าการสะสมของแมงกานีสในส่วนเหนือดินมากกว่า 10,000 mg ของน้ำหนักแห้ง โดยส่วนใหญ่เป็นไม้พุ่มหรือไม้ยืนต้นในวงศ์ Apocynaceae, Celastraceae, Clusiaceae, Myrtaceae และ Proteaceae [23] สำหรับการศึกษาในครั้งนี้มิได้มีการนำไม้พุ่มที่สร้างเนื้อไม้หรือไม้ยืนต้นมาวิเคราะห์ด้วย และไม่พบว่าพืชล้มลุกที่คัดเลือกมาชนิดใดมีคุณสมบัติเป็น Mn hyperaccumulator เลย

สังกะสี (Zn) เป็นจุลสารอาหาร (micronutrient) ที่พืชต้องการในปริมาณน้อยเช่นเดียวกับแมงกานีส แม้ว่าปริมาณสังกะสีในดินบริเวณเก็บตัวอย่าง จะไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด แต่จากการวิเคราะห์พบพืช 2 ชนิด ที่มีคุณสมบัติเป็น Zn hyperaccumulator คือ หญ้าตีนตุ๊กแกและสะเดาดิน จึงเป็นพืชที่น่าสนใจหากต้องการศึกษาต่อในอนาคต สำหรับพืชที่มีรายงานการเป็น Zn hyperaccumu-lator นั้น ในประเทศไทยได้มีรายงานว่าหญ้าก้านพวงหรือกระจุกไก่ (*Justicia procumbens* L.) ที่เจริญ เติบโตได้ดีในพื้นที่เหมืองสังกะสีผาแดง จังหวัดตาก เป็นพืชชนิดเดียวจาก 36 ชนิด ในการศึกษาในครั้งนั้น ที่มีคุณสมบัติเป็น Zn hyperaccumulator [22] อย่างไรก็ตาม ในพื้นที่บริเวณรอบเหมืองทองคำ จังหวัดพิจิตร ไม่พบพืชชนิดดังกล่าว

ตะกั่ว (Pb) เป็นโลหะหนักที่มีปริมาณต่ำกว่าค่ามาตรฐานค่อนข้างมากทุกจุดเก็บตัวอย่าง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โลหะชนิดดังกล่าวในต้นพืช และเช่นเดียวกับสารหนูและแคดเมียม โดยตะกั่วไม่ได้จัดเป็นธาตุอาหารที่พืชจะต้องใช้เพื่อการเจริญเติบโต จึงอาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ในเนื้อเยื่อของพืชไม่มีการสะสมของธาตุโลหะหนักดังกล่าว

พืชใบเลี้ยงเดี่ยว 3 ชนิด ที่เลือกมาศึกษา เนื่องจากเป็นชนิดเด่นที่มีการเจริญมาก ได้แก่ หญ้าขจรจบ หญ้าชันกาด และหญ้านกสีชมพู ทั้งหมดเป็นพืชในวงศ์หญ้า (Poaceae) พืชในวงศ์นี้หลายชนิดมีรายงานถึงการนำมาใช้บำบัดความเป็นพิษจากการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินเช่นกัน อาทิ หญ้าแฝก 2 ชนิด คือ *Vetiveria zizanioides* Nash. และ *V. nemoralis* A. Camus [24,25] แต่จากผลการวิเคราะห์ครั้งนี้จะเห็นได้ว่าไม่มีหญ้าชนิดใดเลยที่มีศักยภาพในการดูดซับและสะสมโลหะหนักจนสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มใดกลุ่มหนึ่ง แม้ว่าจะเป็นพืชล้มลุกใบเลี้ยงเดี่ยวในวงศ์หญ้า และมีระบบรากแบบรากฝอยเช่นเดียวกับหญ้าแฝกก็ตาม แต่หญ้าต่างชนิดก็มีการตอบสนองต่อสภาวะการปนเปื้อนของดินที่แตกต่างกันไป เช่นเดียวกับพืชในวงศ์ทานตะวัน (Asteraceae) หลายชนิดที่มีรายงานถึงการเป็น metal hyperaccumulator ดังที่กล่าวมาแล้ว แต่ผลจากงานวิจัยในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าไม่ใช่ทุกชนิดในวงศ์เดียวกัน หรือแม้แต่เป็นชนิดเดียวกันอย่างสาบเสือแต่ขึ้นในสภาวะแวดล้อมที่ต่างกันก็อาจมีศักยภาพในการดูดซับและสะสมโลหะหนักต่างกันได้ การจะเลือกชนิดของพืชล้มลุกมาใช้เพื่อฟื้นฟูสภาพดินที่ปนเปื้อนอย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องอาศัยการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับคุณสมบัติของดิน ภูมิประเทศ และภูมิอากาศในบริเวณนั้น ๆ เพื่อเลือกพืชที่ดีที่สุดและมี

ความเหมาะสมกับสภาพพื้นของแต่ละท้องถิ่น

5. สรุป

ผลจากการวิเคราะห์โลหะหนักในดินพบว่ามีค่าสารหนูสูงเกินกว่าค่ามาตรฐาน ในทุกบริเวณที่ศึกษา (1.5-17 เท่าของค่ามาตรฐาน) แคดเมียมและแมงกานีสพบ 1 ตำแหน่ง ที่มีค่าสูงกว่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าสารหนูเป็นสารหลักที่มีปัญหาการปนเปื้อนดินของพื้นที่เหมืองทองแห่งนี้

พืชที่นำมาวิเคราะห์ในการศึกษาครั้งนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 14 ชนิด แบ่งเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว 3 ชนิด และพืชใบเลี้ยงคู่ 11 ชนิด โดยพบพืชที่มีลักษณะเป็น metal hyperaccumulator ต่อสังกะสี 2 ชนิด คือ หญ้าตีนตุ๊กแกและสะเดาดิน metal excluder ต่อสังกะสี จำนวน 1 ชนิด ได้แก่ ย่านาง metal excluder ต่อแมงกานีส จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ หญ้ายาง แมงลักคา และต้อยติ่ง metal indicator ต่อแมงกานีส พบ 2 ชนิด ได้แก่ หญ้างวงช้าง หญ้าตีนตุ๊กแก จะเห็นได้ว่าพืชชนิดหนึ่ง ๆ สามารถมีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะได้มากกว่า 1 ประเภท ในขณะที่มีพืชหลายชนิดที่ไม่สามารถจำแนกคุณสมบัติในการดูดซับโลหะเป็นประเภทใดได้เลย แม้ว่าจะเป็นพืชที่ขึ้นเป็นชนิดเด่นในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักก็ตาม และสารหนูเป็นสารที่มีปัญหาการปนเปื้อนมากที่สุด แต่ไม่พบพืชที่สามารถดูดซับและสะสมสารหนูเลย เนื่องจากไม่พบธาตุดังกล่าวในพืชจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP-OES

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมูลนิธิสาธารณสุขแห่งชาติ ปี 2558 ทีมผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เรณู เวชรัชต์พิมล ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ปรึกษาโครงการฯ และคุณธัญญารัศมิ์ สินทรธรรมทัช ตลอดจนชาวบ้านในตำบลเขาเจ็ดลูก อำเภอทับคล้อ จังหวัดพิจิตร สำหรับความร่วมมือและให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติงานภาคสนาม

7. รายการอ้างอิง

[1] Perrino, E.V., Brunetti, G. and Farrag, K., 2014, Plant communities in multi-metal contaminated soils: A case study in the National Park of Alta Murgia (Apulia region, Southern Italy), Int. J. Phytore-mediation 16: 871-88.

[2] Raab, A., Schat, H., Meharg, A.A. and Feldmann, J., 2005, Uptake, translocation and transformation of arsenate and arsenite in sunflower (*Helianthus annuus*): Formation of arsenic-phytochelatin complexes during exposure to high arsenic concentrations, New Phytol. 168: 551-558.

[3] Su, Y.H., McGrath, S.P., Zhu, Y.G. and Zhao, F.J., 2008, Highly efficient xylem transport of arsenite in the arsenic hyper-accumulator *Pteris vittata*, New Phytol. 180: 434-441.

[4] Tanhan, P., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P. and Chaiyarat, R., 2007, Uptake and accumulation of cadmium, lead and zinc by Siam weed [*Chromolaena odorata* (L.) King & Robinson], Chemosphere 68: 323-329.

[5] Baker, A.J.M. and Walker, P.L., 1990, Ecophysiology of Metal Uptake by Tolerant Plants, pp.155-177, In Shaw, A.J. (Ed.),

Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects, CRC Press, Inc., Florida.

[6] Sarma, H., 2011, Metal hyperaccumulation in plants: A review focusing on phytoremediation technology, Environ. Sci. Technol. 4: 118-138.

[7] Upatham, E.S., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P., Panich-Pat, T. and Lanza, G.R., 2015, Phytoremidiation in Thailand: A Summary of Selected Research and Case Histories. Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants 1: 333-342.

[8] กรมอนามัย, 2558, แนวทางการเฝ้าระวังพื้นที่เสี่ยง กรณีเหมืองแร่ทองคำ, กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, กรุงเทพฯ, 59 น.

[9] Mganga, N., Manoko, M.L.K. and Rulangaranga, Z.K., 2011, Classification of plants according to their heavy metal content around North Mara gold mine, Tanzania: Implication for phytoremediation, Tanz. J. Sci. 37: 109-119.

[10] Garbisu, C. and Alkorta, I., 2001, Phytoextraction: A cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment, Bioresour. Technol. 77: 229-236.

[11] Baker, A.J.M. and Brooks, R.R., 1989, Terrestrials higher plants which hyper accumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry, Biorecovery 1: 81-126.

[12] Rakesh Sharma, M.S., and Raju, N.S., 2013, Correlation of heavy metal contamination with soil properties of industrial areas of Mysore, Karnataka, India by cluster analysis, Int. Res. J. Environ. Sci. 2(10): 22-27.

[13] Wang, A.S., Angle, J.S., Chaney, R. L., Delorme, T.A. and Reeves, R.D., 2006, Soil pH effects on uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens*, Plant Soil 281: 325-337.

[14] รายงานผลการประชุมคณะกรรมการเพื่อแก้ไขปัญหาจากการดำเนินกิจการของเหมืองแร่ทองคำ จังหวัดพิจิตร เพื่อรับทราบผลการวิเคราะห์ข้อมูลการปนเปื้อนสารโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม วันที่ 27 กุมภาพันธ์ 2558 ณ ห้องประชุมหลวงพ่อเพชร ชั้น 4 ศาลากลางจังหวัดพิจิตร.

[15] Williams, P.N., Villada, A, Deacon, C., Raab, A., Figuerola, J., Green, A.J., Feldmann, J. and Meharg A.A., 2007, Greatly enhanced arsenic shoot assimilation in rice leads to elevated grain levels compared to wheat and barley, Environ. Sci. Technol. 41: 6854-6859.

[16] Zhao, F.J., Ma, J.F., Meharg, A.A. and McGrath, S.P., 2009, Arsenic uptake and metabolism in plants, New Phytol. 181: 777-94.

[17] Bleeker, P.M., Hakvoort, H.W.J., Bliek, M., Souer, E. and Schat, H., 2006, Enhanced arsenate reduction by a CDC25-like tyrosine phosphatase explains increased phytochelatin accumulation in arsenate-

tolerant Holcus lanatus, Plant J. 45: 917-929.

[18] Arnetoli, M., Vooijs, R., ten Bookum, W., Galardi, F., Gonnelli, C., Gabbrielli, R., Schat, H. and Verkleij, J.A.C., 2008, Arsenate tolerance in Silene paradoxa does not rely on phytochelatin-dependent sequestration, Environ. Pollut. 152: 585-591.

[19] Ma, L.Q., Komar, K.M., Tu, C., Zhang, W., Cai, Y. and Kennelley, E.D. 2001, A fern that hyperaccumulates arsenic, Nature 409: 579.

[20] Francesconi, K., Visoottiviseth, P., Sridokchan, W. and Goessler, W., 2002, Arsenic species in an arsenic hyperaccumulating fern, *Pityrogramma calomelanos*: A potential phytoremediator of arsenic-contaminated soils, Sci. Total Environ. 284: 27-35.

[21] Smolders, E., 2001, Cadmium uptake by plants, Int. J. Occup. Med. Environ. Health 14: 177-183.

[22] Phaenark,C.,Pokethitiyook,P.,Kruatrachue, M. and Ngernsansaruay, C., 2009, Cd and Zn accumulation in plants from the Padaeng zinc mine area, Int. J. Phytoremediation 11: 479-495.

[23] Xu, X., Shi, J., Chen, Y., Chen, X., Wang, H. and Perera, A., 2006, Distribution and mobility of manganese in the hyperaccumulator plant *Phytolacca acinosa* Roxb (Phytolaccaceae), Plant Soil 285: 323-331.

[24] Chantachon, S., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P., Upatham, E.S., Tantanasarit, S. and Soonthornsarathool, V., 2004, Phytoextraction and accumulation of lead from contaminated soil by vetiver grass: Laboratory and simulated field study, Water Air Soil Pollut. 154: 37-55.

[25] Roongtanakiat, N., 2009, Vetiver phytoremediation for heavy metal decontamination, Pacific Rim Vetiver Network Technical Bulletin 2009/1, The Office of the Royal Development Projects Board, Bangkok.