

อิทธิพลของคุณสมบัติทางเคมีของดินและชนิดของสารหนุต่อการดูดสะสมสารหนุของธูปฤๅษีในสภาพดินน้ำขัง
Influence of Soil Chemical Properties and Arsenic Species on Arsenic Accumulation of
Typha angustifolia (L.) in Submerged Soil Condition

จอมจันท์ นทีวัฒนา^{1*} ศิริเพ็ญ ตรีไชยพร² มะลิวัลย์ แซ่อ้อย³ ประศักดิ์ ถาวรยุดติการณ⁴

และ สมพร ชุนห์ลือชานนท์³

Jomjun Nateewattana^{1*} Siripen Trichaiyaporn² Maliwan Saouy³ Prasak Thavornyutikarn⁴

and Somporn Choonluchanon³

¹หลักสูตรการจัดการสารอันตรายและสิ่งแวดล้อม (หลักสูตรนานาชาติ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

³ภาควิชาปฐพีศาสตร์และอนุรักษ์ศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

⁴ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

¹International Program in Hazardous Substance and Environmental Management, Chulalongkorn University

²Department of Biology, Faculty of Science, Chiang Mai University

³Department of Soil Science and Conservation, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University

⁴Department of Chemistry, Faculty of Science, Chiang Mai University

*E-mail: jomjun_102@hotmail.com

Received: Sep 23, 2022

Revised: Oct 25, 2022

Accepted: Nov 01, 2022

บทคัดย่อ

ธูปฤๅษีเป็นพืชที่สามารถกำจัดสารหนุจากดินโดยการดูดซับจากดินมาสะสมในพืช งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติทางเคมีของดิน และชนิดของสารหนุต่อการดูดสะสมสารหนุของธูปฤๅษีในสภาพดินน้ำขัง โดยคุณสมบัติทางเคมีของดินที่ศึกษา ได้แก่ ความเป็นกรดต่าง ศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชัน เหล็กที่สกัดได้ อะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ แมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ งานวิจัยนี้เป็นแบบแฟคทอเรียล 3 × 4 ประกอบด้วย 2 ปัจจัย ปัจจัยแรก คือ ชนิดของดิน ซึ่งได้แก่ ดินที่ไม่มีสารหนุ (ชุดควบคุม) ดินที่มีอาร์เซนไนต์ [As(III)] และดินที่มีอาร์เซนเนต [As(V)] ส่วนปัจจัยที่ 2 คือ จำนวนวันที่เพาะปลูกธูปฤๅษี ซึ่งได้แก่ 15, 30, 45 และ 60 วัน ตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของดินทุกชุดก่อนการปลูกธูปฤๅษี และตรวจสอบปริมาณสารหนุทั้งหมดที่ธูปฤๅษีดูดสะสมหลังจากการปลูกธูปฤๅษีเป็นเวลา 15, 30, 45 และ 60 วัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความเป็นกรดต่าง ศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชัน ปริมาณของอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ ปริมาณของแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และปริมาณของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในดินทุกชุด ส่วนเหล็กที่สกัดได้มีในดินที่มีอาร์เซนไนต์ และดินที่มีอาร์เซนเนตมากกว่าในดินชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีในดินที่มีอาร์เซนเนต และดินชุดควบคุมมากกว่าในดินที่มีอาร์เซนไนต์อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้จากการศึกษาพบว่าธูปฤๅษีดูดสะสมอาร์เซนไนต์ได้ดีกว่าอาร์เซนเนตในทุกช่วงเวลาที่ผ่านมา การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่สามารถใช้พยากรณ์ปริมาณสารหนุทั้งหมดที่ธูปฤๅษีดูดสะสม ได้แก่ ศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชัน ชนิดของสารหนุ และแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ โดยสมการพยากรณ์ คือ $TAA = 197.834 - 0.350 (Eh) + 25.150 (AS) - 0.218 (Ca)$ เมื่อ TAA คือ ปริมาณสารหนุทั้งหมดที่ธูปฤๅษีดูดสะสม Eh คือ ศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชัน AS คือ ชนิดของสารหนุ และ Ca คือ แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้

คำสำคัญ: สารหนุ ธูปฤๅษี ดินน้ำขัง คุณสมบัติทางเคมีของดิน

Abstract

Typha angustifolia (L.) is a plant capable of removing arsenic from soil by absorbing it from soil to accumulate in the plant. This research aimed to study influence of soil chemical properties and arsenic species on arsenic accumulation of *T. angustifolia* in submerged soil condition. The soil chemical properties to be studied were pH, oxidation reduction potential (Eh), extractable iron, exchangeable aluminium, exchangeable magnesium, exchangeable calcium and available phosphorus. This research was a 3 × 4 factorial design consisting of 2 factors. The first factor was soil type including soil without arsenic (control), soil with arsenite [As(III)] and soil with arsenate [As(V)]. The second factor was the cultivation period of *T. angustifolia* including 15, 30, 45 and 60 days. The chemical properties of all soil types were examined before planting *T. angustifolia* and total arsenic accumulation of *T. angustifolia* was examined after planting *T. angustifolia* for 15, 30, 45 and 60 days. The results demonstrated that pH, Eh and the amounts of exchangeable aluminium, exchangeable magnesium and available phosphorus were not significantly different among all soil types. The amounts of extractable iron in the soils with arsenite and arsenate were significantly higher than that in the control soil. The amounts of exchangeable calcium in the soil with arsenate and the control soil were significantly higher than that in the soil with arsenite. Furthermore, it was also found that *T. angustifolia* accumulated arsenite better than arsenate at all examination periods. Multiple regression analysis demonstrated that factors capable of being used to predict total arsenic accumulation of *T. angustifolia* were oxidation reduction potential, arsenic species and exchangeable calcium. The prediction equation was $TAA = 197.834 - 0.350 (Eh) + 25.150 (AS) - 0.218 (Ca)$ where TAA = total arsenic accumulation of *T. angustifolia*, Eh = oxidation reduction potential, AS = arsenic species and Ca = exchangeable calcium.

Keywords: Arsenic, *Typha angustifolia* (L.), Submerged soil, Soil chemical properties

1. บทนำ

สารหนู (Arsenic) เป็นธาตุที่พบบนพื้นผิวโลกตามธรรมชาติ มีเลขออกซิเดชัน +5, +3, 0, -3 รูปหลักที่พบเป็นรูปอนินทรีย์ สามารถก่อกวนกับออกซิเจน (Oxygen) และหมู่เมทิล (Methyl group) ก่อตัวเป็นรูปสารหนูอินทรีย์ โดยจะปรากฏรูปได้ขึ้นกับความเป็นกรดต่าง (pH) และศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชันของดิน (Oxidation reduction potential; Eh) [1] สารหนูในรูปอาร์เซเนต [Arsenate; As(V)] พบมากในสภาวะที่มีออกซิเจน ขณะที่ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนจะพบในรูปอาร์เซไนต์ [Arsenite; As(III)] ซึ่งทั้งสองรูปสามารถเปลี่ยนรูปสลับไปมาในดิน อาร์เซไนต์ละลายน้ำและเคลื่อนย้าย (Transfer) ได้ดีกว่าอาร์เซเนต [2]

การดูดซับสารหนูในดินขึ้นกับองค์ประกอบของแข็งในดิน ได้แก่ แร่ดินเหนียว เหล็กออกไซด์ (Ferric oxide) แมงกานีสออกไซด์ (Manganese oxide) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) และแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) และความสามารถขององค์ประกอบดังกล่าวในการดูดซับสารหนู เหล็กออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ดูดซับสารหนูได้ดี โดยอัตราการดูดซับจะลดลงตามเวลา โดยจะ

เกิดขึ้นรวดเร็วในช่วงแรก แล้วจึงช้าลงจนคงที่ นอกจากนี้การดูดซับสารหนูในดินยังขึ้นกับความเป็นกรดต่างและศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชันและรีดักชันของดิน โดยการดูดซับอาร์เซเนตจะลดลง เมื่อความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดูดซับอาร์เซไนต์จะเพิ่มขึ้น เมื่อความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้น [3], [4]

พืชหลายชนิดมีความสามารถในการดูดสะสม (Accumulation) สารหนูจากดิน [5] โดยพืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดสะสมสารหนูได้แตกต่างกัน และสารหนูก็มีผลต่อการดูดซึมธาตุอาหารหลักของพืชได้แตกต่างกัน และยังอาจมีผลทำลายธาตุอาหารหลักของพืช นอกจากนี้ธาตุอาหารหลักของพืชเองก็อาจมีผลต่อการดูดสะสมสารหนู [6]

ธาตุอาหารหลักที่เกี่ยวข้องและมีผลต่อการดูดสะสมสารหนูของพืชได้แก่ ฟอสฟอรัส (Phosphorus) แคลเซียม (Calcium) แมกนีเซียม (Magnesium) เหล็ก (Iron) และอะลูมิเนียม (Aluminium) ฟอสฟอรัสพบมากในรูปฟอสเฟต (Phosphate) โดยฟอสเฟตเป็นธาตุที่มีสมบัติคล้ายคลึงกับอาร์เซเนต จึงมักแย่งหรือแข่งขันกันในการทำปฏิกิริยากับสารอื่น ด้วยเหตุนี้ฟอสเฟตจึงมีอิทธิพลเชิงลบต่อการดูดสะสมอาร์เซเนต ในขณะที่ไม่มีอิทธิพลต่อการดูดสะสมอาร์เซไนต์ แต่

อย่างไรก็ตามการดูดสะสมอาร์เซนิกไม่ได้ถูกกดยอย่างสมบูรณ์โดยการเพิ่มขึ้นของฟอสเฟตในดิน [7] แคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็กในรูปเฟอร์ริก (Ferric) สามารถตกตะกอนร่วมกับสารหนู เป็นของแข็งไม่ละลาย ซึ่งมีผลทำให้สารหนูไม่สามารถถูกเคลื่อนย้ายได้ [8] อะลูมิเนียมในรูปอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) อะลูมิเนียม(ออกซิ)ไฮดรอกไซด์ (Aluminium(oxy)hydroxide) สามารถก่อกวนกับสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในดิน รวมทั้งสารหนูในดิน [9], [10] จึงมีบทบาทสำคัญในการตรึงสารหนู และควบคุมการเคลื่อนย้ายสารหนูในดิน ด้วยเหตุที่ความเป็นกรดต่างของดินมีผลต่อคุณสมบัติของธาตุอาหารหลักของพืช จึงส่งผลต่อการดูดสะสมสารหนูด้วย โดยอาร์เซนิตจะถูกดูดสะสมได้มากกว่า อาร์เซนิตภายในช่วงความเป็นกรดต่างระหว่าง 4 ถึง 8 อย่างมีนัยสำคัญ [11], [12]

ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อความสามารถของพืชในการดูดสะสมสารหนู คือ ความสามารถในการทนต่อความเป็นพิษของสารหนู สารหนูไม่ใช่ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช แต่สามารถกระตุ้นการเจริญของพืช เมื่อมีความเข้มข้นต่ำ ความเป็นพิษของสารหนู จะพบได้ในพืชที่มีความต้านทานต่ำ โดยสารหนูจะไปมีผลยับยั้งการเจริญของราก การเปลี่ยนสีของใบ การแคระแกรน และการตายของพืช กลไกการจัดการความเครียด (Stress) จากสารหนูของพืช เช่น การลดการสะสมสารหนูของพืช การเกิดรีดักชัน (Reduction) การเกิดคีเลชัน (Chelation) และกระบวนการกำจัดสารหนูออก (Efflux) โดยทั่วไปอาร์เซนิตมีพิษมากกว่าอาร์เซนิต สารหนูอนินทรีย์เป็นพิษมากกว่าสารหนูอินทรีย์ [13] การวิจัยนี้เป็นงานระยะที่ 2 โดยงานระยะแรกได้ศึกษาคุณลักษณะการเป็นพิษบำบัดของรูปธาตุซีต่อการดูดสะสมอาร์เซนิตและอาร์เซนิต [14] สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของคุณสมบัติทางเคมีของดินต่อการดูดสะสมสารหนูของรูปธาตุซีในสภาพดินน้ำขัง โดยคุณสมบัติทางเคมีของดินที่ศึกษา ได้แก่ ความเป็นกรดต่าง ศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชัน เหล็กที่สกัดได้ อะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ แมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. การออกแบบการทดลอง และการเตรียมตัวอย่าง

รูปแบบการทดลองเป็นแบบแฟคทอเรียล 3 × 4 (3 × 4 factorial design) ประกอบด้วย 2 ปัจจัย ปัจจัยแรก

คือ ชนิดของดิน ซึ่งได้แก่ ดินที่ไม่มีสารหนู (ชุดควบคุม) ดินที่มีอาร์เซนิต [As(III)] และดินที่มีอาร์เซนิต [As(V)] ส่วนปัจจัยที่ 2 คือ จำนวนวันที่เพาะปลูกรูปธาตุซี ซึ่งได้แก่ 15, 30, 45 และ 60 วัน ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

ดินตะกอนท้องน้ำ (Submerged soil) ในการทดลองนี้ใช้ดินมาจากอำเภอหางดง จังหวัดเชียงใหม่ นำมาตากลมให้แห้ง นำมาบด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร เตรียมโซเดียมอาร์เซนิต (Sodium arsenite, NaAsO₂) และไดโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซนิต (Disodium hydrogen arsenate, Na₂HAsO₄·7H₂O) ที่ความเข้มข้น 175 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากนั้นนำดินมาคลุกเคล้าให้เข้ากันกับสารละลายสารหนูที่เตรียมไว้ เตรียมกระถางขนาด 12 × 12 นิ้ว ใส่ดินที่มีสารหนูจำนวน 5 กิโลกรัมต่อกระถาง ในชุดควบคุมใช้ดินที่ไม่มีสารหนู การเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำมาวิเคราะห์ทำโดยเก็บตัวอย่างดินที่ระดับต่ำกว่าผิวดิน 15 เซนติเมตร นำไปอบที่ 70 องศาเซลเซียส บด และร่อนผ่านตะแกรง 2 มิลลิเมตร เก็บในถุงพลาสติกที่แห้งสนิทเพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

รูปธาตุซีที่ใช้ในการทดลองนี้ได้จากพื้นที่อำเภอหางดง จังหวัดเชียงใหม่ โดยเลือกขนาดต้นที่มีความสูงระหว่าง 100-120 เซนติเมตร ปลูกกระถางละ 3 ต้น นำรูปธาตุซีมาปลูกลงในดินที่เตรียมไว้ เมื่อครบกำหนดเวลาเพาะปลูกในแต่ละช่วงเวลา (15, 30, 45 และ 60 วัน) นำมาล้างให้สะอาด ชั่งน้ำหนัก แล้วจึงนำไปอบให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ นำมาบดที่ 85 องศาเซลเซียส เก็บในถุงพลาสติกที่แห้งสนิทเพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

2.2. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดิน ทำดังนี้ การวัดค่าความเป็นกรดต่างใช้ pH meter การวัดศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชันใช้ Eh meter การหาปริมาณเหล็กที่สกัดได้ใช้วิธี DTPA (Diethylenetriaminepentaacetic acid) micronutrient extraction method การหาปริมาณอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ใช้วิธี Spectrophotometer การหาปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ใช้วิธี Atomic absorption spectrophotometer (AAS) และการหาปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ใช้วิธี Bray II ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่รูปธาตุซีสะสม ใช้วิธี Hydride generation atomic absorption spectroscopy (HG-AAS) (Table 1)

2.3. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย (Mean) ใช้วิธี Duncan's multiple range test (DMRT) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ (คุณสมบัติทางเคมีของดิน) กับปริมาณสารหนูทั้งหมดที่รูดสะสมใช้วิธีสหสัมพันธ์เพียร์สัน

(Pearson correlation) ส่วนการวิเคราะห์ปัจจัยที่ใช้ร่วมกันในการทำนายปริมาณสารหนูทั้งหมดที่รูดสะสมใช้วิธีวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณแบบขั้นตอน (Stepwise multiple regression analysis) การวิเคราะห์ทางสถิติทั้งหมดใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

Table 1 Methods for analysis of soil chemical properties and total arsenic accumulation of *T. angustifolia*

Analyzed parameters	Methods
pH	pH meter; Takemura DM-13 (<i>in situ</i>)
Oxidation reduction potential	Eh meter; Hanna HI98331 (<i>in situ</i>)
Extractable iron	DTPA micronutrient extraction method [14]
Exchangeable aluminium	Spectrometer [14]
Exchangeable magnesium	Atomic absorption spectrophotometer (AAS) [14]
Exchangeable calcium	Atomic absorption spectrophotometer (AAS) [14]
Available phosphorus	Bray II [14]
Total arsenic accumulation of <i>T. angustifolia</i>	Hydride generation atomic absorption spectroscopy [15]

3. ผลการวิจัย

3.1. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดิน

3.1.1. การวิเคราะห์ความเป็นกรดต่างของดิน

จากการวิเคราะห์ความเป็นกรดต่างของดิน พบว่าค่าเฉลี่ยของความเป็นกรดต่างของดินชุดควบคุม ดินที่มีอาร์เซไนต์ และดินที่มีอาร์เซเนต มีค่าเท่ากับ 7.05, 7.28 และ 7.45 ตามลำดับ โดยดินที่มีอาร์เซเนตมีการกระจายของข้อมูลสูงที่สุด (Figure 1A) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) พบว่า ไม่มีความแตกต่างในทุกชุดดินอย่างมีนัยสำคัญ (P-value = 0.136)

3.1.2. การวิเคราะห์ศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชันของดิน

จากการวิเคราะห์ศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชันของดิน พบว่า ค่าเฉลี่ยของศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชันของดินชุดควบคุม ดินที่มีอาร์เซไนต์ และดินที่มีอาร์เซเนต มีค่าเท่ากับ -81, -113.75 และ -112.50 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โดยดินที่มีอาร์เซเนตมีการกระจายของข้อมูลสูงที่สุด (Figure 1B) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT พบว่า ไม่มีความแตกต่างในทุกชุดดินอย่างมีนัยสำคัญ (P-value = 0.067)

3.1.3. การวิเคราะห์ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดิน

จากการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดิน พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินชุดควบคุม ดินที่มีอาร์เซไนต์ และดินที่มีอาร์เซเนต มีค่าเท่ากับ 441.83, 568.92 และ 508.92 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Figure 1C) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT พบว่า ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินที่มีอาร์เซไนต์ และดินที่มีอาร์เซเนตมีความแตกต่างจากปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ (P-value = 0.006) ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการใส่อาร์เซไนต์ และอาร์เซเนตมีผลต่อปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดิน โดยดินชุดควบคุมมีปริมาณเหล็กที่สกัดได้น้อยกว่าชุดที่ใส่สารหนูทั้งสองชนิด เนื่องจากเหล็กถูกปลดปล่อยออกมาจากดินเมื่อใส่สารหนู

3.1.4. การวิเคราะห์ปริมาณอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

จากการวิเคราะห์ปริมาณอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินชุดควบคุม ดินที่มีอาร์เซไนต์ และดินที่มีอาร์เซเนต มี

ค่าเท่ากับ 0.02550, 0.02342 และ 0.01483 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Figure 1D) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT พบว่า ไม่มีความแตกต่างในทุกชุดดินอย่างมีนัยสำคัญ (P-value = 0.157)

3.1.5. การวิเคราะห์ปริมาณแมงกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

จากการวิเคราะห์ปริมาณแมงกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณแมงกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินชุดควบคุม ดินที่มีอาร์เซนไนต์ และดินที่มีอาร์เซนเนต มีค่าเท่ากับ 28.42, 24.67 และ 32.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Figure 1E) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT พบว่า ไม่มีความแตกต่างในทุกชุดดินอย่างมีนัยสำคัญ (P-value = 0.290)

3.1.6. การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

จากการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินชุดควบคุม ดินที่มีอาร์เซนไนต์ และดินที่มีอาร์เซนเนต มีค่าเท่ากับ 964.25, 846.67 และ 1,014.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Figure 1F) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT พบว่า ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินที่มีอาร์เซนเนต และดินชุดควบคุมมีความแตกต่างจากปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินที่มีอาร์เซนไนต์อย่างมีนัยสำคัญ (P-value = 0.001) ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการใส่อาร์เซนไนต์มีผลต่อปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน โดยดินที่มีอาร์เซนไนต์มีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้น้อยกว่าดินอีก 2 ชุด เนื่องจากอาร์เซนไนต์สามารถก่อพันธะกับแคลเซียมได้ดีกว่าอาร์เซนเนต จึงทำให้แคลเซียมถูกดึงดูมาจับกับอาร์เซนไนต์ และเหลือแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้น้อยลง

3.1.7. การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน

จากการวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินชุดควบคุม ดินที่มีอาร์เซนไนต์ และดินที่มีอาร์เซนเนต มีค่าเท่ากับ 10.42, 9.83 และ 10.92 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Figure 1G) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT พบว่า ไม่มีความแตกต่างในทุกชุดดินอย่างมีนัยสำคัญ (P-value = 0.344)

3.2. การวิเคราะห์ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่รูปฤๅษีดูดสะสม

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่รูปฤๅษีดูดสะสม โดยหาค่าเฉลี่ยของปริมาณสารหนูทั้งหมดที่รูปฤๅษีดูดสะสมที่เวลาการปลูกต่าง ๆ (15, 30, 45 และ 60 วัน) จากดินทั้งสามชนิด พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณสารหนูทั้งหมดที่รูปฤๅษีดูดสะสมจากดินชุดควบคุม ดินที่มีอาร์เซนไนต์ และดินที่มีอาร์เซนเนต มีค่าเท่ากับ 1.67, 181.50 และ 127.42 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Figure 2) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT พบว่า ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่รูปฤๅษีดูดสะสมจากดินแต่ละชนิดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P-value = 0.000) ผลการทดลองนี้เป็นการยืนยันว่ารูปฤๅษีดูดสะสมสารหนูในรูปอาร์เซนไนต์ได้ดีกว่าในรูปอาร์เซนเนต

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่รูปฤๅษีดูดสะสมที่เวลาการปลูกต่าง ๆ (15, 30, 45 และ 60 วัน) จากดินชุดควบคุม ดินที่มีอาร์เซนไนต์ และดินที่มีอาร์เซนเนต พบว่า ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่รูปฤๅษีดูดสะสมจากดินที่มีอาร์เซนไนต์มีค่ามากที่สุดในทุกช่วงเวลา (Table 2) นอกจากนี้ยังพบว่ารูปฤๅษีดูดสะสมสารหนูจากดินที่มีอาร์เซนไนต์ได้ดีที่สุดที่เวลาการปลูก 45 วัน ในขณะที่ดูดสะสมสารหนูจากดินที่มีอาร์เซนเนตได้ดีที่สุดที่เวลาการปลูก 60 วัน (Table 2) ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่ารูปฤๅษีดูดสะสมสารหนูในรูปอาร์เซนไนต์ได้ดีกว่าในรูปอาร์เซนเนต

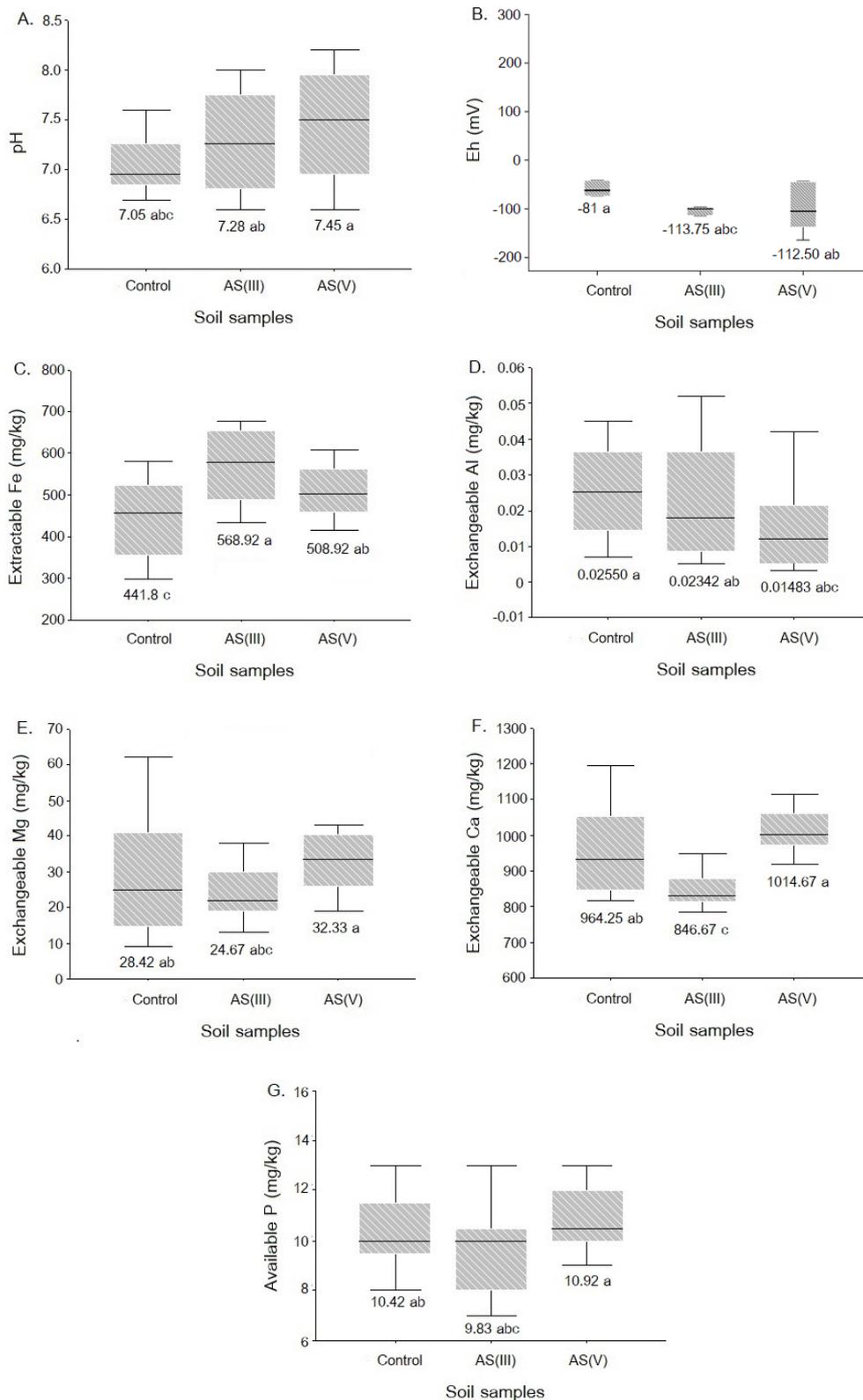


Figure 1 Chemical properties of control soil and soils with arsenite [As(III)] and with arsenate [As(V)]

A. pH; B. Oxidation reduction potential; C. Extractable iron; D. Exchangeable aluminium;

E. Exchangeable magnesium; F. Exchangeable calcium; G. Available phosphorus

In each figure, means with related letters (a, ab, abc) are not significantly different.

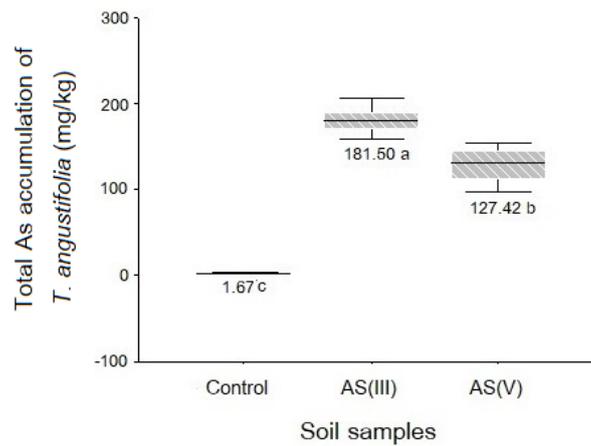


Figure 2 Total arsenic accumulation of *T. angustifolia* grown in control soil and soils with arsenite [As(III)] and with arsenate [As(V)]
Means with different letters (a, b, c) are significantly different.

Table 2 Total arsenic accumulation of *T. angustifolia* grown in control soil and soils with arsenite [As(III)] and arsenate [As(V)] at different cultivation periods

Soil types	Total arsenic accumulation of <i>T. angustifolia</i> (mg/kg)			
	15-day period	30-day period	45-day period	60-day period
Control soil	2 ^{c/ab}	1 ^{c/c}	2.67 ^{c/a}	1 ^{c/c}
Soil with As(III)	163 ^{a/d}	177.33 ^{a/c}	201 ^{a/a}	184.67 ^{a/b}
Soil with As(V)	100 ^{b/d}	121 ^{b/c}	140 ^{b/b}	148.67 ^{b/a}

Different superscript letters before (/) indicate significant difference among means within a column.

Different superscript letters after (/) indicate significant difference among means within a row.

3.3. การวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สัน และการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณของปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของธูปฤๅษี

Table 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของธูปฤๅษี ซึ่งได้จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson correlation analysis) จาก Table 3 พบว่า วันที่เพาะปลูกธูปฤๅษี ชนิดของสารหนู ความเป็นกรดต่าง และเหล็กที่สกัดได้ มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณสารหนูทั้งหมดที่ธูปฤๅษีดูดสะสมอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson correlation coefficient; r) เท่ากับ 0.440**, 0.513**, 0.072**, 0.466** (P-value < 0.01) ตามลำดับ ในขณะที่ศักยภาพการเกิด

ออกซิเดชันรีดักชัน และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ มีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณสารหนูทั้งหมดที่ธูปฤๅษีดูดสะสมอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (r) เท่ากับ -0.600** และ -0.478* (P-value < 0.01 และ 0.05) ตามลำดับ

ในการนำปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดสะสมสารหนูของธูปฤๅษีไปใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression analysis) ปัจจัยเหล่านั้นต้องไม่มีปัญหาว่ามีความสัมพันธ์ต่อกันมากเกินไป (Multicollinearity) เพราะจะทำให้ผลการวิเคราะห์มีความคลาดเคลื่อน หากยึดตามเกณฑ์ของ Stevens [16] ปัจจัยที่เหมาะสมจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณต้องมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างกันน้อยกว่า 0.80

จากการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเพื่อสร้างสมการพยากรณ์ตัวแปรตามหนึ่งตัวจากตัวแปรอิสระหลายตัว โดยให้ตัวแปรตาม (Dependent variable) คือ ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่รูปฤๅษีดูดสะสม พบว่าตัวแปรอิสระ หรือตัวแปรพยากรณ์ (Independent variable หรือ Predictor variable) ที่เหมาะต่อการใช้พยากรณ์ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่รูปฤๅษีดูดสะสมมี 3 ตัว คือ ศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชัน ชนิดของสารหนู และแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Table 4) ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามหนึ่งตัวกับตัวแปรพยากรณ์หลายตัว ตัวแปรพยากรณ์เหล่านั้นควรเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งเกณฑ์ที่นิยมใช้เพื่อบ่งบอกว่าตัวแปรพยากรณ์เป็นอิสระต่อกันหรือไม่ คือ ค่า Variance inflation factor (VIF) [17] หากค่านี้น้อยกว่า 10 แสดงว่าตัวแปรพยากรณ์มีความเป็นอิสระต่อกัน และเหมาะที่จะใช้ร่วมกันในการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม จากการวิเคราะห์พบว่าค่า VIF ของตัวแปรพยากรณ์ทั้ง 3 ตัวในการศึกษานี้มีค่าอยู่ในช่วง 1.007-1.033 ซึ่งแสดงว่าเป็นอิสระต่อกัน และเหมาะสมที่จะใช้พยากรณ์ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่รูปฤๅษีดูดสะสม จากการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรพยากรณ์ทั้ง 3 ตัวสามารถร่วมกันพยากรณ์

ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่รูปฤๅษีดูดสะสมได้ร้อยละ 63.3 โดยมีค่า Adjusted R² เท่ากับ 0.633 เมื่อนำตัวแปรพยากรณ์ทั้งหมดมาเขียนสมการพยากรณ์ ได้สมการดังนี้

$$TAA = 197.834 - 0.350 (Eh) + 25.150 (AS) - 0.218 (Ca)$$

เมื่อ TAA คือ ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่รูปฤๅษีดูดสะสม

Eh คือ ศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชัน

AS คือ ชนิดของสารหนู

Ca คือ แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้

จากสมการพบว่าสารหนูทั้งหมดถูกดูดสะสมโดยรูปฤๅษีมากกว่าที่สะสมอยู่ในดิน โดยพิจารณาจากค่าคงที่ของสมการ (Constant value) ซึ่งเท่ากับ 197.834 นอกจากนี้จากสมการยังพบว่าชนิดของสารหนูมีผลเชิงบวกต่อการดูดสะสมสารหนูของรูปฤๅษี ส่วนศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชัน และแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีผลเชิงลบต่อการดูดสะสมสารหนูของรูปฤๅษี กล่าวคือเมื่อศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชัน หรือแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีค่าลดลง จะส่งเสริมการดูดสะสมสารหนูของรูปฤๅษี

Table 3 Pearson correlation analysis of all factors influencing total arsenic accumulation of *T. angustifolia*

Factors [#]	TAA	CT	AS	pH	Eh	P	Ca	Mg	Fe	Al
TAA	1									
CT	0.440**	1								
AS	0.513**	0.000	1							
pH	0.072**	0.621**	0.246	1						
Eh	-0.600**	-0.663**	-0.081	-0.464**	1					
P	-0.091	0.010	0.101	0.159	-0.010	1				
Ca	-0.213	0.143	0.157	0.110	0.013	-0.091	1			
Mg	-0.478**	-0.546**	0.055	-0.492**	0.885**	-0.093	0.204	1		
Fe	0.446**	-0.437**	0.238	-0.078	-0.281*	-0.166	-0.246	-0.288*	1	
Al	0.110	0.002	-0.236	0.327*	-0.420**	-0.255*	0.037	-0.541**	0.514**	1

[#]TAA = Total arsenic accumulation of *T. angustifolia*; CT = Cultivation time of *T. angustifolia*; AS = Arsenic species; Eh = Oxidation reduction potential; P = Available phosphorus; Ca = Exchangeable calcium; Mg = Exchangeable magnesium; Fe = Extractable iron; Al = Exchangeable aluminium

**Statistically significant at the 0.01 level

*Statistically significant at the 0.05 level

Table 4 Multiple regression analysis

Variables [#]	b	Std. Error	Beta	t	P-value	VIF
(Constant)	197.834	65.964		2.999	0.005	
Eh	-0.350	0.058	-0.555	-6.052	0.000	1.007
AS	25.150	4.551	0.513	5.527	0.000	1.033
Ca	-0.218	0.071	-0.286	-3.093	0.004	1.026

R = 0.811, R² = 0.658, adjusted R² = 0.633, F = 9.564, P-value = 0.004, Durbin-Watson = 0.688

[#]Eh = Oxidation reduction potential; AS = Arsenic species; Ca = Exchangeable calcium

4. อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาของ Gersztyn et al. [18] และ Masscheleyn et al. [1] พบว่า การปรากฏของอาร์เซนิตและอาร์เซนเตในน้ำและตะกอนดินตามธรรมชาติขึ้นกับสมบัติของดินโดยเฉพาะความเป็นกรดต่างและศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชันและรีดักชัน โดยอาร์เซนเตจะเป็นรูปเด่นเมื่อความเป็นกรดต่างมากกว่า 10 และอาร์เซนิตจะเป็นรูปเด่นเมื่อความเป็นกรดต่างน้อยกว่า 6 นอกจากนี้ในสภาวะออกซิเดชัน (ค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชันและรีดักชันเป็นบวก) อาร์เซนเตจะเป็นรูปเด่น ในการทดลองครั้งนี้จากช่วงความเป็นกรดต่างและค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชันและรีดักชันของดินน้ำขังคือ ความเป็นกรดต่างประมาณ 7 และค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชันและรีดักชันติดลบ ส่งผลให้อาร์เซนิตจะปรากฏเป็นรูปเด่นกว่า

พืชหลายชนิดมีความสามารถในการดูดสะสมสารหนูจากดิน โดยพืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดสะสมสารหนูได้แตกต่างกัน จากการทดลองของ Nateewattana et al. [14] ซึ่งศึกษาการใช้รูปฤๅษีในการบำบัดสารหนูชนิดอาร์เซนิตและอาร์เซนเตในดินชุ่มน้ำ พบว่า รูปฤๅษีเป็นพืชที่ดูดสะสมสารหนูได้ดี จัดเป็นพืชไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์ (Hyperaccumulator) โดยสะสมอาร์เซนิตมากกว่าอาร์เซนเต และเมื่อผู้วิจัยทดสอบในพุทธรักษาพบว่า พุทธรักษาเป็นพืชที่ดูดสะสมสารหนูได้ดี โดยสะสมอาร์เซนเตมากกว่าอาร์เซนิต และมีสมบัติเป็นพืชไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์เช่นกัน [19] จากการศึกษาของ Aksorn and Visoottiviseth [20] ในการทดสอบพืชโผล่พื้นน้ำ 5 ชนิดได้แก่ รูปฤๅษี พุทธรักษา บอน ธรรมรักษาใบต่าง และกล้วยน้ำข่อย พบว่า บอนเป็นพืชที่ดีที่สุดในการดูดสะสมสารหนู และจากการศึกษาของ Phuekvilai et al. [21] พบว่าจากการสำรวจพืชล้มลุก 11 ชนิดบริเวณเหมืองทองคำ อ. ทับคล้อ จ. พิจิตร ไม่พบพืชที่มีสมบัติเป็นพืชไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์ แต่

พบ 7 ชนิดที่มีสมบัติเป็น อาร์เซนิกเอกซ์คลูเดอร์ (Arsenic excluder) ได้แก่ ตองตึง ถั่วทาวนส์วิลล์สโตโล แมงลักดาหล่ำขั้ดมอญ หล่ำขั้จวบ หล่ำดอกขาว และหล่ำพวง

จากการทดลองของ Niero [22] ซึ่งทำการบำบัดสารหนูปนเปื้อนในดินโดยใช้สารประกอบเหล็กพบว่าความเข้มข้นสารหนูถูกควบคุมโดยการตกตะกอนหรือการดูดซับบนเฟสแร่ เช่น เพอร์ริก(ออกซี)ไฮดรอกไซด์ [Fe(III)oxy hydroxide] เพอร์ริกออกไซด์ [Fe(III)oxide] โดยเพอร์ริกออกไซด์มาจากการผุพังของสัณฐานของเหล็กออกซีไฮดรอกไซด์ (Amorphous Fe oxyhydroxide) และโดยทั่วไปตามธรรมชาติมักพบมากในรูปไฮดรรัสเพอร์ริกออกไซด์ [Hydrous ferric oxide (HFO)] หรือเพอร์ริกไฮไดรด์ (Ferric hydride) เมื่อสารหนูถูกดูดซับด้วยไฮดรรัสเพอร์ริกออกไซด์ จะได้เป็น อาร์เซนิก-ไฮดรรัสเพอร์ริกออกไซด์ (As - HFO) ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปเป็นแบบเสถียรเพิ่มขึ้น และยังสามารถรวมตัวกับจุลธาตุ (Trace elements) เกิดเป็นโครงสร้างใหม่ และปลดปล่อยเข้าสู่ในโพรงดิน (Porewater) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าการดูดซับอาร์เซนิตกับอาร์เซนเตบนไฮดรรัสเพอร์ริกออกไซด์ขึ้นกับความเป็นกรดต่างและความเข้มข้นสารหนู [23] การดูดซับอาร์เซนเตลดลงสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของความเป็นกรดต่าง โดยเฉพาะเมื่อความเป็นกรดต่างมากกว่า 7 และการดูดซับจะสูงสุด เมื่อค่าความเป็นกรดต่างต่ำ คืออยู่ระหว่าง 3 ถึง 7 สำหรับอาร์เซนิตมีการดูดซับมากที่สุดเมื่อความเป็นกรดต่างมีค่าเป็นกลาง และการดูดซับจะลดลง เมื่อความเป็นกรดต่างสูงหรือต่ำเกินไป จากผลของการทดลองนี้พบว่าดินชุดที่ใส่สารหนูมีการตรวจพบเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้มากกว่าดินชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ แสดงถึงว่าสารประกอบเหล็กมีการก่อกับกับสารหนูในดิน จึงถูกดึงออกมาจากดินได้มากขึ้น และดินชุดที่ใส่อาร์เซนิตมีเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้ปริมาณมากกว่าดินชุดที่ใส่อาร์เซนเต

Giles et al. [12] ศึกษาพบว่าอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้มีปริมาณไม่แน่นอนในดิน ซึ่งถูกควบคุมโดยความเป็นกรดต่างและองค์ประกอบในทางแร่ของดิน เนื่องจากสามารถก่อกำพันระกับสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในดิน และแลกเปลี่ยนประจุอย่างอิสระกับประจุบวกอื่น ๆ เช่น แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) โพแทสเซียมไอออน (K^+) หากความเป็นกรดต่างมากกว่า 8 การตกตะกอนของอะลูมิเนียมจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ในสภาวะที่เป็นกรด อะลูมิเนียมจะละลายออกมาอย่างมาก ดังนั้นอะลูมิเนียมจะเกิดความเป็นพิษร้ายแรงที่ความเป็นกรดต่างน้อยกว่า 5 เพราะอะลูมิเนียมจะละลายออกมาอย่างชัดเจน ดินกรดจะเต็มไปด้วยอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Masue et al. [11] อะลูมิเนียมในรูปอะลูมิเนียมและเหล็กออกไซด์ [Al/Fe oxides] และอะลูมิเนียมและเหล็ก (ออกซิ)ไฮดรอกไซด์ [Al/Fe(oxy)hydroxides] สามารถรีดิวสารหนู และควบคุมการเคลื่อนย้ายสารหนูในพื้นที่ชุ่มน้ำ โดยอาร์เซนสามารถถูกดูดซับหรือตกตะกอนอย่างรวดเร็วโดยจะขึ้นกับความเป็นกรดต่างและศักยภาพการเกิดออกซิเดชันและรีดักชัน ทำให้ลดความเข้มข้นของสารหนูจากน้ำผิวดินและตะกอนดิน โดยอาร์เซนจะถูกดูดซับมากกว่าอาร์เซนในตัวอย่างรวดเร็วในช่วงความเป็นกรดต่างระหว่าง 4 ถึง 8 อย่างมีนัยสำคัญ จากศึกษาวิจัยนี้ไม่พบความแตกต่างของปริมาณอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน เนื่องจากเป็นการศึกษาอะลูมิเนียมในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งมีปริมาณน้อย

แมกนีเซียมในดินสามารถอยู่ในรูปไอออนที่ถูกสารคอลลอยด์ (colloids) ของดินดูดซับไว้เรียกว่า แมกนีเซียมที่ถูกดูดซับ (Adsorbed Mg^{2+}) หรืออยู่ในรูปแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Mg) ในดินที่เป็นกรดและอยู่ในแถบชุ่มชื้นแมกนีเซียมจะถูกคอลลอยด์ของดินดูดซับไว้มากเป็นอันดับที่ 3 รองจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) [24] Ghosh et al. [25] พบว่า การก่อกำพันของแข็งโดยแมกนีเซียม (Mg coagulant) สามารถลดปริมาณอาร์เซนไนต์และอาร์เซนไนต์ที่ละลายได้ในดินไปเป็นรูปที่ไม่ละลาย ปฏิกริยาดังกล่าวเกี่ยวข้องกับ 2 หลักการดังนี้ (1) การตกตะกอนของสารหนุร่วมกับแมกนีเซียมเป็นแมกนีเซียมอาร์เซนไนต์ [$\text{Mg}(\text{HASO}_4)$] และแมกนีเซียมอาร์เซนไนต์ [$\text{Mg}(\text{HASO}_3)$] และ (2) การดูดซับสารหนุบนผิวของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ [$\text{Mg}(\text{OH})_2$] ประสิทธิภาพในการตกตะกอนและการดูดซับของอาร์เซนไนต์มีค่าน้อยกว่าอาร์เซนไนต์

ณ ความเป็นกรดต่างน้อยกว่าเท่ากับ 7.5 จากการทดลองในครั้งนี้อาจพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของแมกนีเซียมในแต่ละชุดดิน เนื่องจากศึกษาแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ซึ่งเป็นรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์และมีปริมาณน้อยในดิน โดยพบว่าดินชุดที่ใส่อาร์เซนไนต์มีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้น้อยกว่าดินชุดที่ใส่อาร์เซนไนต์ สอดคล้องกับการศึกษาข้างต้นที่พบว่า ประสิทธิภาพในการตกตะกอนและการดูดซับของอาร์เซนไนต์มีค่าน้อยกว่าอาร์เซนไนต์ ณ ความเป็นกรดต่างเข้าใกล้ 7

แคลเซียมอาร์เซนไนต์ไม่สามารถก่อกำพันที่ค่าความเป็นกรดต่างน้อยกว่า 11.5 และจะก่อกำพันที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 12 และ 12.5 ค่าความเป็นกรดต่างของดินน้ำขังอยู่ที่ประมาณ 7 ดังนั้นอาร์เซนไนต์จึงไม่ก่อตัว หรือตกตะกอนกับแคลเซียม และสามารถถูกชะออกมาได้ แต่ในสภาวะดังกล่าวแคลเซียมสามารถจับกับอาร์เซนไนต์ เกิดเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ [9] แคลเซียมอาร์เซนไนต์ก่อกำพันได้ทันทีเมื่อมีอาร์เซนไนต์ในทุกความเข้มข้น โดยไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของแคลเซียม [10], [26] ตัวอย่างงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมสามารถดูดซับสารหนูได้ เช่น Bothe and Brown [27] ได้ทดลองเพิ่มปูนขาว (Calcium carbonate) ให้ขยะที่ปนเปื้อนสารหนู พบว่ามีผลการเคลื่อนย้ายสารหนุผ่านการก่อกำพันของแคลเซียมอาร์เซนไนต์ [$\text{Ca}(\text{AsO}_4)_2$] นอกจากนี้ยังมีการทดลองอีกมากมายที่ยืนยันบทบาทของแคลเซียมต่อการดูดซับสารหนุ โดยแคลเซียมมีผลต่อการดูดซับสารหนุอย่างชัดเจน เมื่อค่าความเป็นกรดต่างสูงกว่า 10.5 [9] จากผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่าดินที่ใส่อาร์เซนไนต์มีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ที่พบในดินที่ใส่อาร์เซนไนต์ และดินชุดควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นที่พบว่าแคลเซียมสามารถจับกับอาร์เซนไนต์เกิดเป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ

ฟอสฟอรัสพบมากในรูปฟอสเฟต โดยฟอสเฟตมีโครงสร้างคล้ายกับอาร์เซนไนต์จึงแข่งขันกันก่อกำพันระกับธาตุนั้นในดิน ดังนั้นฟอสเฟตจึงมีผลต่อการดูดซับสารหนุโดยพืช ซึ่งขึ้นกับชนิดของสารหนุ และชนิดของพืช ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่มาจากภาคการเกษตร โดยได้มาจากหินฟอสเฟต ซึ่งนำมาผลิตเป็นปุ๋ยฟอสเฟต โดยฟอสฟอรัสจะหลุดออกมากับน้ำ และตะกอนดิน เหล็ก อะลูมิเนียม และแคลเซียมในดินสามารถจับกับฟอสฟอรัสได้ดี การมีเหล็ก อะลูมิเนียม และแคลเซียมในดินมากเกินไปจะทำให้ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินลดลง

เนื่องจากฟอสฟอรัสถูกตรึงในดินโดยเหล็ก อะลูมิเนียม และแคลเซียม [28], [29] การจับกับของธาตุดังกล่าวกับฟอสฟอรัสขึ้นอยู่กับความเป็นกรดต่างของดิน โดยที่ค่าความเป็นกรดต่างมากกว่า 7.2 ฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูป $H_2PO_4^-$ และสามารถทำปฏิกิริยากับเหล็ก และแคลเซียมเกิดไอออนเชิงซ้อนของเหล็กฟอสเฟต และแคลเซียมฟอสเฟต ($FeH_2PO_4^+$, $CaHPO_4$) นอกจากนี้ที่ความเป็นกรดต่างดังกล่าว ฟอสฟอรัสยังสามารถเกิดไอออนเชิงซ้อนกับแมกนีเซียมได้เช่นกันเกิดเป็นแมกนีเซียมฟอสเฟต ($MgHPO_4$) ดังนั้นในสภาวะที่ดินเป็นด่าง ฟอสฟอรัสที่มีประโยชน์จะลดลง เนื่องจากถูกตรึงไว้กับธาตุอื่น ๆ ส่วนในสภาวะที่ดินเป็นกรด (ค่าความเป็นกรดต่างน้อยกว่า 7) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินจะมีปริมาณสูงสุด เนื่องจากไม่ถูกตรึงไว้กับธาตุอื่น ๆ [28] ในการวิจัยครั้งนี้พบว่า ฟอสฟอรัสในทุกชุดดินไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์ในรูปแบบฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ซึ่งพืชนำไปใช้ประโยชน์โดยตรง

5. บทสรุป

ธูปฤๅษีเป็นพืชที่ดูดสะสมสารหนูได้ดี แต่การดูดสะสมสารหนูของธูปฤๅษีขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง โดยปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ คุณสมบัติทางเคมีของดิน และชนิดของสารหนู จากการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของดิน 3 ชุด คือ ดินชุดควบคุม ดินที่มีอาร์เซนไนต์ และดินที่มีอาร์เซนเตต โดยดินที่ใช้เป็นดินที่อยู่ในสภาพน้ำขัง พบว่าค่าความเป็นกรดต่างศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชัน ปริมาณของอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ ปริมาณของแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และปริมาณของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในดินทุกชุด ส่วนเหล็กที่สกัดได้ในดินที่มีอาร์เซนไนต์ และดินที่มีอาร์เซนเตตมากกว่าในดินชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ และแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินที่มีอาร์เซนเตต และดินชุดควบคุมมากกว่าในดินที่มีอาร์เซนไนต์อย่างมีนัยสำคัญ จากการตรวจสอบปริมาณสารหนูทั้งหมดที่ธูปฤๅษีดูดสะสม พบว่าธูปฤๅษีดูดสะสมอาร์เซนไนต์ได้ดีกว่าอาร์เซนเตตในทุกช่วงเวลาที่เราตรวจวัด (15, 30, 45 และ 60 วันหลังจากการปลูกธูปฤๅษี) สมการพยากรณ์ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่ธูปฤๅษีดูดสะสมที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณแสดงให้เห็นว่า ชนิดของสารหนูมีผลเชิงบวกต่อการดูดสะสมสารหนูของธูปฤๅษี ส่วนศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชัน และแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีผลเชิงลบต่อการดูดสะสมสารหนูของธูปฤๅษี

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต โดยได้รับทุนสนับสนุนจากหลักสูตรสาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม (นานาชาติ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบัณฑิตวิทยาลัยแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเผยแพร่ความรู้ด้านการบำบัดโดยพืชน้ำ เพื่อบำบัดสารหนูในดินน้ำขัง และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่เป็นอย่างยิ่งที่ทำให้การสนับสนุนการทำงานทดลองจนสำเร็จด้วยดี และผู้ร่วมงานและผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่ายที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยครั้งนี้

7. References

- [1] Masscheleyn, P.H., Delaune, R.D. and Patrick, W.H. 1991. Effect of redox potential and pH on arsenic speciation and solubility in a contaminated soil. *Environmental Science & Technology*. 25(8): 1414-1419.
- [2] Lee, K.S. and et al. 2015. The fate and factors determining arsenic mobility of arsenic in soil-A review. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. 48(2): 73-80.
- [3] Sun, W. and et al. 2009. Arsenite and ferrous iron oxidation linked to chemolithotrophic denitrification for the immobilization of arsenic in anoxic environments. *Environmental Science & Technology*. 43(17): 6585-6591.
- [4] Lin, T.F. and Wu, J.K. 2001. Adsorption of arsenite and arsenate within activated alumina grains: Equilibrium and kinetics. *Water Research*. 35(8): 2049-2057.
- [5] Bhattacharya, S. and et al. 2021. Arsenic uptake and bioaccumulation in plants: A review on remediation and socio-economic perspective in Southeast Asia. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 15: 100430.
- [6] Dixit, S. and Hering, J.G. 2003. Comparison of arsenic(V) and arsenic(III) sorption onto iron oxide minerals: Implications for arsenic mobility. *Environmental Science & Technology*. 37(18): 4182-4189.

- [7] Shaibur, M.R., Adjadeh, T.A. and Kawai, S. 2013. Effect of phosphorus on the concentrations of arsenic, iron and some other elements in barley grown hydroponically. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**. 13(1): 87-98.
- [8] Bednar, A.J. and et al. 2005. Effects of iron on arsenic speciation and redox chemistry in acid mine water. **Journal of Geochemical Exploration**. 85(2): 55-62.
- [9] Azam, M.S., Shafiquzzaman, M. and Nakajima, J. 2010. Effect of calcium and magnesium addition on arsenic leaching from paddy field soil by Bangladesh. **Journal of Water and Environment Technology**. 8(4): 329-338.
- [10] Smith, E., Naidu, R. and Alston, A.M. 2002. Chemistry of inorganic arsenic in soils II. Effect of phosphorus, sodium, and calcium on arsenic sorption. **Journal of Environmental Quality**. 31(2): 557-563.
- [11] Masue, Y., Loeppert, R.H. and Kramer, T.A. 2007. Arsenate and arsenite adsorption and desorption behavior on coprecipitated aluminum: iron hydroxides. **Environmental Science & Technology**. 41(3): 837-842.
- [12] Giles, D.E. and et al. 2011. Iron and aluminium based adsorption strategies for removing arsenic from water. **Journal of Environmental Management**. 92(12): 3011-3022.
- [13] Abbas, G. and et al. 2018. Arsenic uptake, toxicity, detoxification, and speciation in plants: physiological, biochemical, and molecular aspects. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. 15(1): 59.
- [14] Nateewattana, J. and et al. 2018. Arsenic remediation in speciation of arsenite As(III) and arsenate As(V) in submerged soil by *Typha angustifolia* L. **KKU Science Journal**. 46(3): 506-516. (in Thai)
- [15] John, R., Estefan, G. and Rashid, A. 2001. **Soil and Plant Analysis Laboratory Manual**. 2nd edition. Beirut: International Center for Agricultural Research in the Dry Areas.
- [16] Stevens, J. 1992. **Applied Multivariate Statistics for the Social Sciences**. 2nd edition. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associate, Inc.
- [17] Marcoulides, K.M. and Raykov, T. 2019. Evaluation of variance inflation factors in regression models using latent variable modeling methods. **Educational and Psychological Measurement**. 79(5): 874-882.
- [18] Gersztyn, L., Karczewska, A. and Galka, B. 2013. Influence of pH on the solubility of arsenic in heavily contaminated soils. **Environmental Protection and Natural Resources**. 3(5): 7-11.
- [19] Nateewattana, N. and et al. 2018. Arsenic phytoremediation of submerged soil using *Canna glauca* (L.). **Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University**. 21(1): 90-100. (in Thai)
- [20] Aksorn, E. and Visoottiviset, P. 2004. Selection of suitable emergent plants for removal of arsenic from arsenic contaminated water. **ScienceAsia**. 30: 105-113.
- [21] Phuekvilai, P., Sirichamorn, Y. and Yookongkaew, N. 2017. Arsenic accumulation of dominant herbaceous plants growing around gold mine areas. **Thai Science and Technology Journal**. 26(6): 953-967. (in Thai)
- [22] Niero, L. 2013. **Assessment of As Contaminated Soil Stabilized with Iron Amendments by Laboratory and Field Experiments**. M.Sc. Thesis, Universita' Degli Studi Di Padova.
- [23] Magalhaes, M.C.F. 2002. Arsenic. An environmental problem limited by solubility. **Pure and Applied Chemistry**. 74(10): 1843-1850.

- [24] Soil Science Department, Kasetsart University. 2005. **Introduction to Soil Science. 10th edition.** Bangkok: Kasetsart University Press. (*in Thai*)
- [25] Ghosh, B. and et al. 2003. Removal of arsenic from water by coagulation treatment using iron and magnesium salt. **Indian Journal of Chemical Technology.** 10: 87-95.
- [26] Roman-Ross, G. and et al. 2006. Arsenite sorption and co-precipitation with calcite. **Chemical Geology.** 233: 328-336.
- [27] Bothe, J.V. and Brown, P.W. 1991. Arsenic immobilization by calcium arsenate formation. **Environmental Science & Technology.** 33(21): 3806-3811.
- [28] Strawn, D.G. 2018. Review of interactions between phosphorus and arsenic in soils from four case studies. **Geochemical Transactions.** 19: 10.
- [29] Johanna, L. 2017. **Phosphorus in the Sediment of Agricultural Constructed Wetlands.** Ph.D. Dissertation, University of Helsinki.