



แร่ธาตุในดินน้ำขังตามสภาพการทดลองที่ส่งผลต่อการดูดสะสมสารหนูของพุทธรักษา
 The Effects of Soil Minerals in Submerged Soil affecting Arsenic
 Accumulation of *Canna glauca* (L.)

จอมจันทร์ นทีวัฒนา^{1*} ศิริเพ็ญ ตรีโยชยาพร² มะลิวัลย์ แซ่ฮ้อย³ ประศักดิ์ ถาวรยุติการณ์⁴ และสมพร ชุนห์ลือชานนท์³

¹สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (นานาชาติ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

²ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

³ภาควิชาปฐพีศาสตร์และอนุรักษ์ศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

⁴ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

*Corresponding Author, E-mail: jomjun_102@hotmail.com

Received: 15 February 2019 | Revised: 27 May 2019 | Accepted: 10 August 2019

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแร่ธาตุในดินน้ำขังตามสภาพการทดลองที่ส่งผลต่อการดูดสะสมสารหนูของพุทธรักษา ประกอบด้วย ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เหล็กที่สกัดได้ในดิน อะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ผลการศึกษาค่าเฉลี่ยพบว่า ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เหล็กที่สกัดได้ในดิน อะลูมิเนียมแลกเปลี่ยนได้ แคลเซียมแลกเปลี่ยนได้ และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ระหว่าง 13.25 – 13.92, 478.17 – 528.83, 0.01642 – 0.02633, 735.33 – 1066.08 และ 24.83 – 27.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยพบว่า ปริมาณการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของพุทธรักษาในดินที่ใส่อาร์เซนเตมีค่ามากกว่าดินที่ใส่อาร์เซนไนต์ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 159.08 และ 122.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แนวโน้มการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเพาะปลูก ซึ่งจะมีค่าสูงสุดในวันที่ 60 ปัจจัยที่มีผลร่วมกันทำนายการดูดสะสมสารหนูในพุทธรักษา ได้แก่ ชนิดของสารหนู จำนวนวันที่เพาะปลูก พีเอช ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชัน เหล็กที่สกัดได้ในดิน อะลูมิเนียมและแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ โดยสามารถร่วมกันทำนายได้ร้อยละ 96 ดังสมการทำนายการสะสมสารหนูทั้งต้นของพุทธรักษาเท่ากับ - 451.66 + 60.41(ชนิดของสารหนู) + 35.66 (จำนวนวันที่เพาะปลูก) + 22.51(พีเอช) - 0.50 (ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชัน) + 0.29(เหล็กที่สกัดได้ในดิน) - 0.05(แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้) + 777.39(อะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้)

ABSTRACT

This research aimed to study the effects of soil minerals in experimental condition submerged soil to arsenic accumulation in *Canna glauca* (L.) including available P, extractable Fe, exchangeable Al, Ca, and Mg. As a result, the ranges of soil mineral mean were available P, extractable Fe, exchangeable Al, Ca, and Mg between 13.25 – 13.92, 478.17 – 528.83, 0.01642 – 0.02633, 735.33 – 1066.08 and 24.83 – 27.25 mg kg⁻¹, respectively. Means of total arsenic accumulation of *C. glauca* in arsenate higher than arsenite treated soils were 159.08 and 122.17 mg kg⁻¹. The tendency of total arsenic accumulation increased with the cultivation period being the highest value on 60 days. The factors predicting total arsenic accumulation of *C. glauca* were arsenic speciation, planting periods,

pH, Eh, extractable Fe, exchangeable Al and Ca predicted 96%. The prediction model was $-451.66 + 60.41$ (arsenic speciation) $+ 35.66$ (Day) $+ 22.51$ (pH) $- 0.50$ (Eh) $+ 0.29$ (extractable Fe) $- 0.05$ (exchangeable Ca) $+ 777.39$ (exchangeable Al)

คำสำคัญ: สารหนูทั้งหมด อาร์เซนไนต์ อาร์เซนเนต พุทธรักษา แร่ธาตุในดิน

Keywords: Total Arsenic, Arsenite, Arsenate, *Canna glauca* (L.), Soil minerals

1. บทนำ

สารหนูเป็นธาตุกลุ่ม VA เป็นธาตุกึ่งโลหะที่แสดงสมบัติอโลหะเด่นชัด มีเลขออกซิเดชันได้แก่ -3, 0, +3, +5 โดยพบสารหนูในรูปอนินทรีย์เป็นหลัก ตามธรรมชาติพบประมาณร้อยละ 90 ภายใต้สภาวะออกซิเดชันมักพบสารหนูในรูปอาร์เซนเนต [As(V)] เป็นรูปเด่น ขณะที่ภายใต้สภาวะรีดักชันมักพบสารหนูชนิดอาร์เซนไนต์ [As(III)] เปลือกโลกพบสารหนูมีความเข้มข้นระหว่าง 1.5 – 2 mg.kg⁻¹ อยู่ในรูปสารประกอบประมาณ 245 ชนิด โดยร้อยละ 60 เป็นสารประกอบรูปอาร์เซนเนต อีกร้อยละ 20 เป็นรูปสารประกอบอาร์เซนไนต์ (arsenite) ที่เหลือเป็นรูปสารประกอบต่างๆ (Mandal and Suzuki, 2002; Smedley and Kinniburgh, 2002) สารหนูปรากฏในดิน น้ำ อากาศ โดยเกิดตามธรรมชาติและเกิดจากการกิจกรรมของมนุษย์ได้แก่ การทำเหมือง โลหะการ การเกษตร เผาไหม้เชื้อเพลิง ขยะ และการเลี้ยงสัตว์ มาตรฐานสารหนูที่ปนเปื้อนในดินที่องค์การอนามัยโลกกำหนดไม่เกิน 40 mg.kg⁻¹ (WHO, 2000) สำหรับประเทศไทยกรมควบคุมมลพิษกำหนดมาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม และเพื่อการอื่นนอกจากอยู่อาศัยและเกษตรกรรมคือ มีสารหนูในดินไม่เกิน 3.9 และ 27 mg.kg⁻¹ (กรมควบคุมมลพิษ, 2562a) อีกทั้งมาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดินต้องมีสารหนูไม่เกิน 0.1 mg.L⁻¹ (กรมควบคุมมลพิษ, 2562b) และจากมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมต้องมีสารหนูไม่เกิน 0.25 mg.L⁻¹ (กรมควบคุมมลพิษ, 2562c)

สารละลายของดินที่ปนเปื้อนเป็นตัวกำหนดการเคลื่อนตัวของสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม รวมทั้งธาตุอื่นที่ปรากฏในสิ่งแวดล้อม การสกัดแยกสารหนูจากดินสามารถระบุเกี่ยวกับการเคลื่อนตัว การเคลื่อนย้าย ศักยภาพความเป็นพิษ ปริมาณการปนเปื้อนในดิน ซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายไปสู่พืชของเหลว และการดูดสะสมของพืช ซึ่งการสะสมสารพิษของพืชเป็นดัชนีชี้วัดที่สำคัญอย่างหนึ่งถึงการปนเปื้อนสารหนูในดิน (Dickinson et al., 2009; Mench et al., 2009) สารหนูจะปรากฏบ่อยครั้งในรูป

ประจุลบ การคงค้างและการแลกเปลี่ยนสารหนูในดินจะขึ้นกับสมบัติของดิน เช่น พีเอช อินทรีย์วัตถุ แร่ธาตุในดินได้แก่ ซิลิเกตไฟไรต์ การเพิ่มพีเอชในดินมีผลต่อการปลดปล่อยสารหนูในดินและการเคลื่อนย้ายสารหนู เนื่องจากเมื่อพีเอชสูงขึ้นทำให้หมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นจึงเกิดการแลกเปลี่ยนประจุในดิน อาร์เซนเนตและอาร์เซนไนต์จะถูกปลดปล่อยเมื่อพีเอชสูง นอกจากนี้ชนิดของสารหนูสามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ระหว่างอาร์เซนเนตและอาร์เซนไนต์ โดยขึ้นกับพีเอชในดิน นอกเหนือจากปัจจัยศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน โดยอาร์เซนเนตเป็นรูปเด่นเมื่อพีเอชมากกว่า 10 ขณะที่อาร์เซนไนต์เป็นรูปเด่นเมื่อพีเอชน้อยกว่า 6 อาร์เซนไนต์เคลื่อนย้ายง่าย โดยมีพิษมากกว่าอาร์เซนเนต 10 เท่า (Sadiq, 1997) การสกัดแยกสารหนูจากดินจะพัฒนาจากการสกัดประจุลบหรือแอนไอออน ซึ่งสัมพันธ์กับออกไซด์และไฮดรอกไซด์ในดิน พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนของซิลิเกตและอินทรีย์วัตถุมีแนวโน้มเป็นประจุลบและรักษาสมดุลประจุในดิน ทำให้สารหนูซึ่งแสดงประจุลบถูกผลักรอก นอกจากนี้สารหนูที่ถูกสกัดออกมาจะบ่งชี้การก่อกวนระดับกับแร่ธาตุต่างๆ (Dickinson et al., 2009; Mench et al., 2009) โดยพบว่า สารหนูจะตกตะกอนกับเหล็ก แคลเซียม และแมกนีเซียม (Fitz and Wenzel, 2002)

ค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชันเป็นลบส่งผลให้การดูดซับสารหนูไม่ดี การเปลี่ยนแปลงค่า redox potential ทำให้ชนิดของสารหนูเปลี่ยนแปลง ขณะที่ปริมาณออกไซด์ (oxides) และออกซีไฮดรอกไซด์ (oxyhydroxides) ของเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีสที่กระจายในดินจะขึ้นกับพีเอชและศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชัน โดยสภาวะรีดักชันโครงสร้างของออกไซด์และออกซีไฮดรอกไซด์ของเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีสจะแตกออก ซึ่งอาร์เซนเนตจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นอาร์เซนไนต์ และถูกปลดปล่อยออกมา ในสภาวะรีดักชันรุนแรงสารหนูจะตกตะกอนกับเหล็ก - ซัลเฟอร์ (iron - sulfurs) เช่น อาร์เซนไพไรต์ (arsenopyrite) หรือเกิดอาร์เซนิกซัลไฟด์ (arsenic sulfides; AsS, As₂S₃) อีกทั้งปริมาณสารหนูจะถูก

ควบคุมโดยปฏิกิริยาการคงค้าง (Retention reaction) (Fitz and Wenzel, 2002) หากในดินอยู่ในสภาวะออกซิเดชันเหล็กจะถูกออกซิไดส์จากเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ไปเป็นเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) และสารหนูจะถูกออกซิไดส์ไปเป็นอาร์เซเนต (Gräfe and Sparks, 2006) อาร์เซเนตจะดูดซับในออกไซด์ของเหล็ก (iron oxide) ได้ดี สำหรับอาร์เซเนตที่ถูกดูดซับได้ในพื้นผิวออกไซด์ไฮดรอกไซด์ของเหล็ก (Fe- oxyhydroxides) (Cheng et al., 2008; Lin and Puls, 2000) อะลูมิเนียมมีสมบัติในการดูดซับสารหนูคล้ายกับเหล็ก สารประกอบไฮดรอกซิล-อะลูมิเนียม (hydroxyl – aluminium compound) ละลายแพร่ไปในสารละลายดิน เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นอะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ก่อตัวเป็น $AlOH^{2+}$, $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)_3$, $Al(OH)_4^-$ และองค์ประกอบซับซ้อนที่ละลายได้อื่นๆ โดยสร้างพันธะกับสารอนินทรีย์เช่น ซัลเฟต ฟลูออไรด์ โดยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารหนูอนินทรีย์ชนิดอาร์เซเนตที่พีเอชน้อยกว่า 7.5 อาร์เซเนตจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วโดยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ขณะที่อาร์เซเนตว่องไว้น้อยกว่า (Dion et al., 2011)

ฟอสเฟตจะมีคุณสมบัติคล้ายอาร์เซเนต ดังนั้นจึงแข่งขันกันในการก่อกำเนิดตำแหน่งเดียวกันในดิน ฟอสฟอรัสสามารถลดความเป็นพิษของสารหนูโดยขึ้นกับปริมาณฟอสฟอรัสในดิน โดยถ้าความเข้มข้นฟอสฟอรัสต่ำไปจะเพิ่มพิษของสารหนูในดิน ฟอสฟอรัสจะเข้าไปแทนที่สารหนูในอนุภาคดินและปลดปล่อยออกมา เพิ่มความเป็นพิษของสารหนูต่อพืช โดยสารหนูจะเข้าไปยับยั้งการเพิ่มฟอสฟอรัสในพืช และส่งผลให้เกิดการดูดสะสมสารหนูที่มากขึ้น แต่การใช้ฟอสฟอรัสความเข้มข้นสูงจะแข่งขันกับสารหนูที่รากและลดความเป็นพิษลง (Woolson, 1975) แคลเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ถูกพิจารณาในครั้งนี้อย่างยิ่ง เพราะพืชใช้ประโยชน์ได้ดี ปริมาณแคลเซียมในดินแต่ละชนิดขึ้นกับธรรมชาติของวัสดุต้นกำเนิด และการหมุนเวียนตามธรรมชาติ แคลเซียมถูกใช้ในการปรับเสถียร/การทำให้เปลี่ยนรูปเป็นของแข็ง (Stabilization/Solidification; S/S) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดการเคลื่อนย้ายโลหะหนัก รวมทั้งทำให้สารหนูไม่เคลื่อนย้ายในดิน โดยการก่อกำเนิดของตะกอนแคลเซียม-สารหนู (Ca-As precipitates) โดยจะตกตะกอนแคลเซียมอาร์เซเนต [$Ca_3(AsO_4)_2$] และแคลเซียมอาร์เซไนต์ ($CaHAsO_3$) ณ พีเอชสูง นำไปสู่วิธีการบำบัดโดยใช้ปูนขาว (Deok et al., 2004) งานวิจัยของ Bothe and Brown (1999) แนะนำว่า การเติมปูน

ขาวลดการเคลื่อนย้ายสารหนูในสารละลายดินที่ปนเปื้อนเนื่องมาจากการก่อกำเนิดของตะกอนแคลเซียม-สารหนูที่ละลายได้น้อยเช่น $Ca_4(OH)_2(AsO_4)_2 \cdot 4H_2O$ และ $Ca_5(AsO_4)_3(OH)$ สำหรับแมกนีเซียมปรากฏในดินหลายรูป แต่พบรูปที่พบมากคือ รูปที่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนได้ (non-exchangeable form) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ละลายน้ำและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Mg) ซึ่งเป็นรูปที่เป็นธาตุอาหารของพืช ปริมาณแมกนีเซียมจะลดลง เมื่ออะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Al) สูงขึ้น ไอออนประจุบวกอื่นๆ ในดินจะมีอิทธิพลต่อปริมาณแมกนีเซียม (Shree, 2018) การก่อกำเนิดของแข็งโดยแมกนีเซียม (Mg coagulant) ลดปริมาณสารหนูชนิดอาร์เซเนตและอาร์เซไนต์ที่ละลายได้ไปเป็นรูปที่ไม่ละลาย ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องใน 2 หลักการ หนึ่งคือการตกตะกอนโดยตรงมีการก่อกำเนิดของแมกนีเซียมอาร์เซเนต/แมกนีเซียมอาร์เซไนต์ [$Mg(HAsO_4)/Mg(HAsO_3)$] อีกกระบวนการหนึ่งคือ ชนิดที่เคลื่อนย้ายโดยการดูดซับบนผิวของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ [$Mg(OH)_2$] แยกจากสารละลายดินเรียกว่า การตกตะกอนร่วม ประสิทธิภาพในการตกตะกอนและการดูดซับอาร์เซเนตน้อยกว่าอาร์เซไนต์ ณ พีเอชน้อยกว่าเท่ากับ 7.5 (Ghosh et al., 2003)

สภาพน้ำขังเป็นสภาวะจำเพาะที่มีผลต่อการสะสมสารหนูในน้ำและตะกอนดินอย่างยิ่ง เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและชีวเคมีของดินน้ำขังเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยจะคงสภาพรีดักชัน พีเอชจะอยู่ประมาณ 7 การดูดสะสมสารหนูทั้งหมด (Total arsenic) ของพืชได้รับผลกระทบจากชนิดและปริมาณเหล็ก อะลูมิเนียม แคลเซียม แมกนีเซียม และฟอสฟอรัสในดินน้ำขังซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อการดูดสะสมของพืช การตรึงและการปลดปล่อยสารหนูชนิดอาร์เซไนต์และอาร์เซเนตที่ส่งผลต่อการดูดสะสมของพืชอย่างซับซ้อน และส่งผลซึ่งกันและกัน พุทธิรักษามีความเหมาะสมต่อการเป็นพืชบำบัดสารหนูในดินน้ำขัง จากคุณสมบัติเบื้องต้นที่เป็นพืชพื้นถิ่น มีความทนทาน มวลชีวภาพสูง ทนต่อสารพิษได้ในช่วงกว้าง และเก็บเกี่ยวง่าย จากการศึกษาทดลองของจอมจันทร์และคณะ (2562) พบว่า พุทธิรักษาสารหนูดูดสะสมสารหนูทั้งหมดในปริมาณสูง โดยดูดสะสมในส่วนเหนือดินสูงกว่า $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ของน้ำหนักแห้ง ปริมาณสารหนูในส่วนเหนือดินสูงกว่าพืชชนิดเดียวกันที่เจริญเติบโตในพื้นที่ไม่ปนเปื้อนโลหะหนักประมาณ 50 เท่า ต้น

พุทธรักษาสามารถส่งสารพิษสู่ส่วนเหนือดินได้ดี มีค่าปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารพิษสู่ส่วนเหนือดิน (Translocation factor) มากกว่า 1 รวมทั้งมีค่าปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพ (Bioconcentration factor) มากกว่า 1 ในการสะสมสารพิษทั้งหมด สำหรับดินที่ปนเปื้อนสารหนูชนิดอาร์เซเนต ซึ่งผ่านหลักเกณฑ์คุณสมบัติการเป็นพืชบำบัดสารพิษทั้ง 4 ข้อ (วัชโรบล, 2554) นำมาซึ่งการศึกษาสภาวะแวดล้อมที่ส่งผลต่อการดูดสะสมสารพิษทั้งหมดของพุทธรักษา วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาแร่ธาตุในดินน้ำข้างตามสภาพทดลองที่ส่งผลต่อการดูดสะสมสารพิษทั้งหมด (Total arsenic) ของพุทธรักษาประกอบด้วยฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เหล็กที่สกัดได้ในดิน อะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

รูปแบบการทดลองเป็นแบบแฟคทอเรียล 3×4 ในแบบแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design) ประกอบด้วย 2 ปัจจัยคือ ชนิดของสารหนูอนินทรีย์ 2 ชนิดได้แก่ อาร์เซไนต์ [As(III)] และอาร์เซเนต [As(V)] และชุดควบคุม และจำนวนวันที่เพาะปลูกได้แก่ 15, 30, 45 และ 60 วันทำการทดลอง 3 ซ้ำ ดินตะกอนท้องน้ำ (submerged soil) ในการทดลองใช้ชุดดินลำปาง โดยมีเนื้อดินเป็น silty clay loam นำมาตากลมให้แห้ง (air dry) นำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm ต้นพุทธรักษาใช้พันธุ์ *Canna glauca* (L.) เก็บจากพื้นที่ตามธรรมชาติในเขตอำเภอหางดง จังหวัดเชียงใหม่ ทำการอนุบาลพืช และวิเคราะห์สารพิษทั้งหมดในดินและพืชตัวอย่างก่อนทดลอง ต้นพุทธรักษาใช้ต้นโตเต็มวัยขนาด 80 – 100 เซนติเมตร มีจำนวน 5 ใบต่อต้น ปลูกกระถางละ 3 ต้น นำพืชไปปลูกในกระถางขนาด 12×12 นิ้ว ใส่ดินที่บ่มสารหนูจำนวน 5 กิโลกรัมต่อกระถาง ทำการเตรียมโซเดียมอาร์เซไนต์ (Sodium arsenite, NaAsO_2) และไดโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซเนต (Disodium hydrogen arsenate, $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ที่ความเข้มข้น $175 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ โดยนำดินมาคลุกเคล้าให้เข้ากันกับสารละลายสารหนูที่เตรียมไว้ รักษาระดับน้ำในกระถางให้คงที่ 2 เซนติเมตรเหนือผิวดินตลอดการทดลอง ทำการขังน้ำและเพาะปลูกนับเป็นวันที่ 1 ของการทดลอง การเก็บตัวอย่างดินทำที่

ระดับต่ำกว่าผิวดิน 15 เซนติเมตร นำไปอบที่ 70°C บดและร่อนผ่านตะแกรง 2 mm เก็บในถุงพลาสติกแห้งสนิท พืชตัวอย่างเมื่อครบกำหนดเวลาเพาะปลูก นำมาล้างให้สะอาด ซึ่งน้ำหนักรวมทั้งต้น แล้วแยกแต่ละส่วนของต้นพืชซึ่งน้ำหนักอีกครั้ง แล้วจึงนำไปอบให้แห้งที่ 85°C จนน้ำหนักคงที่ แล้วจึงนำมาบด เก็บในถุงพลาสติกแห้งสนิท การวิเคราะห์จะแยกวิเคราะห์แต่ละส่วนของพืช

2.2 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

การตรวจพีเอชและศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชัน (Eh; Oxidation reduction potential) ด้วยเครื่อง pH meter; Takemura รุ่น DM-13 และ Eh meter; Hanna รุ่น HI98331 โดยวัดแบบ *in-situ* สำหรับ Available P ใช้วิธี Bray II (Abdul et al., 2001) Exchangeable Ca และ Mg ใช้วิธี AAS (Abdul et al., 2001) Exchangeable Al ใช้วิธี Spectrometer (Abdul et al., 2001) Exchangeable Fe ใช้วิธี DTPA (Abdul et al., 2001) และ Total As ในดินและพืชใช้วิธี AAS hydride ตามวิธีการย่อยพืชและตรวจวิเคราะห์ของ America Water Work Association Water Environment Federation, 1998

2.3 การวิเคราะห์สถิติ

ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS โดยทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (Mean) การสร้าง Box plot สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson correlation) และใช้วิเคราะห์ความถดถอยพหุคูณ (Multiple regression analysis) ศึกษาปัจจัยแร่ธาตุในดินน้ำข้างที่มีผลต่อการสะสมสารพิษทั้งหมดของพุทธรักษา

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของพีเอชและศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชันในดิน และการดูดสะสมสารพิษทั้งหมด (Total arsenic) ของพุทธรักษา

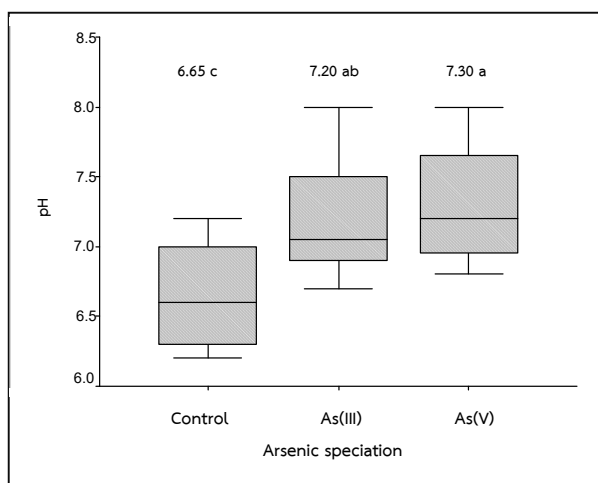
จากรูปที่ 1 พีเอชของดินทุกชุดในการทดลองอยู่ในช่วงกรดเล็กน้อยถึงด่างปานกลาง (Beck, 1999) คือ พีเอชอยู่ในช่วง 6.6 – 7.3 โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของดินแต่ละชุดพบว่า ดินที่ใส่ As(V) > ดินที่ใส่ As(III) > ดินชุดควบคุม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.30, 7.20 และ 6.65 ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของดินโดยวิธี Duncan Multiple Range Test (DMRT) พบว่า ดินที่ใส่อาร์เซไนต์และอาร์เซเนตอยู่ในกลุ่มเดียวกัน และอยู่คนละกลุ่มกับดินชุดควบคุม (P-value < 0.05) การเปรียบเทียบการ

กระจายของข้อมูลตลอดการทดลองพบว่า ดินที่ใส่ As(V) มีการกระจายข้อมูลน้อยกว่าดินที่ใส่ As(III) ในสภาวะเป็นกรดสารหนูจะละลายน้ำได้ดีและตกตะกอนในช่วงที่มีค่าพีเอชสูงขึ้น ขณะเดียวกันการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลในพีเอชสูงจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุในดินเพิ่มขึ้น เมื่อพีเอชสูงอาร์เซนไนต์และอาร์เซเนตจะถูกปลดปล่อยได้มากกว่าเนื่องจากมีสมบัติเป็นแอนไอออน (Sadiq, 1997)

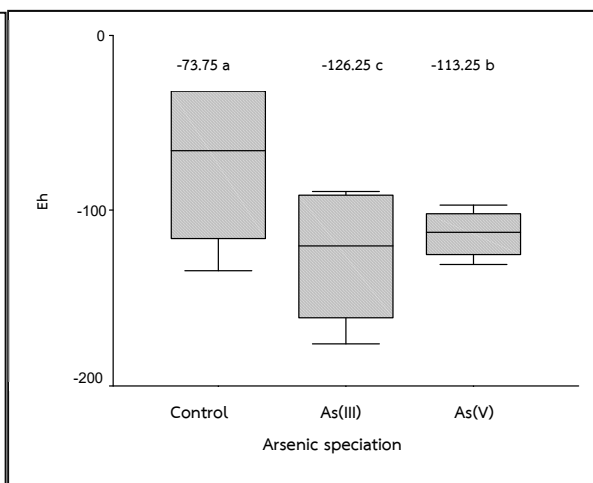
จากรูปที่ 2 ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชันของดินมีค่าติดลบ คืออยู่ในสภาวะรีดักชัน เนื่องจากเป็นดินน้ำขัง โดยเมื่อเรียงลำดับค่าเฉลี่ยของดินแต่ละชุดพบว่า ดินชุดควบคุม > ดินที่ใส่ As(V) > ดินที่ใส่ As(III) คือมีค่าเฉลี่ย -73.75, -113.25 และ -126.25 mV ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของดินพบว่า ดินทุกชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) การเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลตลอดการทดลองพบว่า ดินชุดควบคุมมีการกระจายของข้อมูลมากที่สุด และดินที่ใส่ As(III) มากกว่าดินที่ใส่ As(V) สารหนูจะปรากฏในรูปไดซัลไฟด์กับค่าพีเอชและศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชัน โดยสภาวะออกซิเดชันสารหนูจะอยู่ในรูปอาร์เซนไนต์ได้แก่ H_3AsO_4 ,

$H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$, AsO_4^{3-} และในสภาวะรีดักชันสารหนูจะอยู่ในรูปอาร์เซนไนต์ได้แก่ H_3AsO_3 , $H_2AsO_3^-$, $HAsO_3^{2-}$ (Smedley and Kinniburgh, 2002) ซึ่งสมบัติของสารหนูในระบบดินน้ำขังจะขึ้นกับอิทธิพลของ พีเอชและศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชันเป็นหลัก

จากรูปที่ 3 ค่าการสะสมสารหนูทั้งหมดของพุทธรักษาในดินที่ใส่ As(V) มากกว่าดินที่ใส่ As(III) โดยมีค่าเฉลี่ย 159.08 และ 122.17 $mg.kg^{-1}$ ตามลำดับ โดยมีการสะสมอาร์เซนไนต์มากกว่าอาร์เซนไนต์ คล้ายกับบอนและกอกอียิปต์ที่มีการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดจากดินที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซเนตเท่ากับ 112.08, 138.08 $mg.kg^{-1}$ และ 113.58, 146.08 ตามลำดับ (จอมจันทร์และคณะ, 2561a; จอมจันทร์และคณะ, 2561b) ซึ่งแตกต่างจากรูปลูกที่มีการดูดสะสมสารหนูจากดินที่ใส่อาร์เซนไนต์มากกว่าอาร์เซนไนต์คือ มีค่าเฉลี่ยการดูดสะสมเท่ากับ 181.50 และ 127.42 $mg.kg^{-1}$ ตามลำดับ (จอมจันทร์และคณะ, 2561c) เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของดินพบว่า ดินทุกชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) ดินที่ใส่ As(III) และ As(V) มีค่าการกระจายข้อมูลใกล้เคียงกัน



รูปที่ 1 พีเอชของดินทุกชุดในการทดลอง



รูปที่ 2 ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชันของดิน

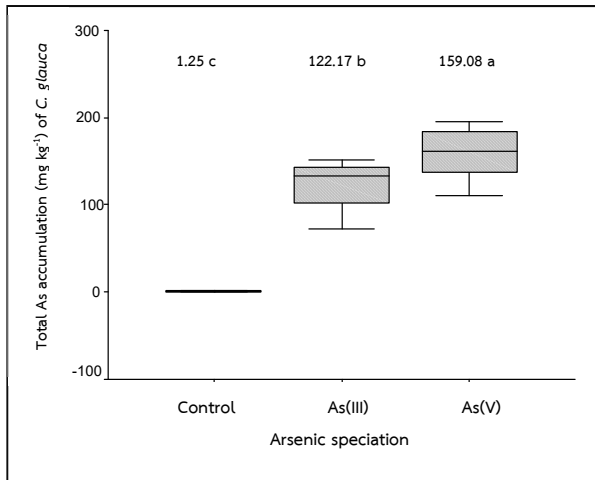
3.2 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแร่ธาตุในดินน้ำขังได้แก่ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เหล็กที่สกัดได้ในดิน อะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้

จากรูปที่ 4 เมื่อเรียงลำดับค่าเฉลี่ยของเหล็กที่สกัดได้ในดินของแต่ละชุดดินพบว่า ดินชุดที่ใส่ As(III) > ดินที่ใส่ As(V) > ดินชุดควบคุม คือมีค่าเฉลี่ย 528.83, 508.67 และ 478.17 mg.kg⁻¹ ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของดินพบว่า ดินทุกชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) ดินชุดควบคุมมีการกระจายตัวของข้อมูลมากที่สุด และดินที่ใส่ As(V) มีการกระจายข้อมูลมากกว่าดินที่ใส่ As(III) เนื่องจากเหล็กที่สกัดได้ในสภาวะที่พีเอชเป็นกรดสารหนูสามารถละลายออกมาได้ดี พีเอชเป็นกลางหรือด่างจะตกตะกอนและถูกดูดซับโดยเหล็กแล้วย้อนกลับสู่สิ่งแวดล้อม (Liu et al., 2004) จากการทดลองพบว่า ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์มีค่าเหล็กในดินสูงกว่าดินที่ใส่อาร์เซนเนต และชุดควบคุมแสดงว่า ดินมีสภาพเป็นกลางถึงด่างเล็กน้อยและศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชันติดลบ ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์มีศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชันต่ำกว่าดินทุกชุด เหล็กจึงถูกปลดปล่อยจากดินได้มากกว่า เนื่องจากอยู่ในสภาพรีดักชัน (Fitz and Wenzel, 2002) หากในดินมีเหล็กออกไซด์สูงและดินมีพีเอชต่ำ เหล็กและอะลูมิเนียมจะดูดซับอาร์เซนไนต์ได้ดี ซึ่งการดูดซับขึ้นกับระยะเวลา อาร์เซนเนตหากอยู่ในพีเอชและศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชันที่เหมาะสมคือ ประมาณ 6.7 ขึ้นไป และศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชันต่ำกว่า -100 mV จะเกิดปฏิกิริยาร่วมและตกตะกอนกับ ไฮดรอกไซด์ออกเหล็ก [Fe(OH)₃] ตามไดอะแกรม pH - Eh ของเหล็ก (Pourbaix diagrams, 2562) อาร์เซนไนต์ในสภาวะรีดักชัน ซึ่งดินมีเฟอร์รัสไอออน [Fe²⁺_(aq)] ในรูปสารละลายแล้ว และอยู่ในช่วงพีเอชและศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชัน ระดับที่สามารถทำปฏิกิริยาร่วมแล้วตกตะกอนได้ จะเกิดเป็น FeAsO₄·H₂O (Scorodite) อาร์เซนเนตถูกดูดซับได้ดีและเคลื่อนย้ายได้น้อยโดยออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม (Fe/Al(hydr) oxides) ในขณะที่อาร์เซนไนต์ถูกดูดซับได้น้อยกว่าโดยออกไซด์

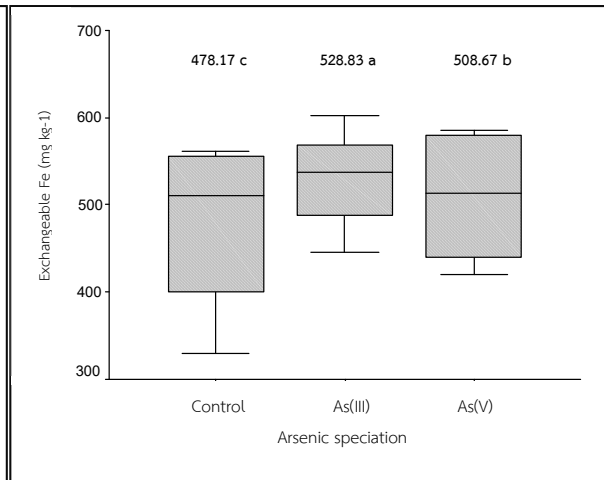
และไฮดรอกไซด์ของเหล็ก (Fe (hydr) oxides) ซึ่งพบมากในดินน้ำขัง (Liu et al., 2005)

จากรูปที่ 5 เมื่อเรียงลำดับค่าเฉลี่ยของอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินแต่ละชุดพบว่า ดินชุดควบคุม > ดินที่ใส่ As(III) > ดินที่ใส่ As(V) โดยมีค่าเฉลี่ย 0.02633, 0.02358 และ 0.01642 mg.kg⁻¹ ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของดินพบว่า ดินทุกชุดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การกระจายของข้อมูลพบว่า ดินที่ใส่ As(V) มีการกระจายตัวน้อยที่สุด และดินที่ใส่ As(III) มีการกระจายตัวมากที่สุด จากการทดลองอะลูมิเนียมมีปริมาณไม่แตกต่างกันและมีปริมาณน้อย เพราะตรวจวิเคราะห์ในรูปอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ ซึ่งเป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ การละลายของอะลูมิเนียมขึ้นกับพีเอช อะลูมิเนียมละลายได้ดีในดินกรด (ณัฐพลและคณะ, 2554) อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารหนูอนินทรีย์ชนิดอาร์เซนเนต ณ พีเอชน้อยกว่า 7.5 อาร์เซนเนตจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วโดยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ขณะที่อาร์เซนไนต์มีความว่องไวน้อยกว่า (Dion et al., 2011)

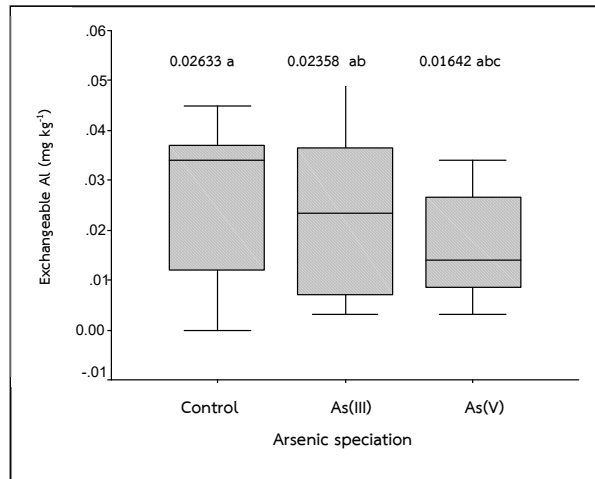
จากรูปที่ 6 เมื่อเรียงลำดับค่าเฉลี่ยของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของดินแต่ละชุดพบว่า ดินชุดควบคุม > ดินที่ใส่ As(III) > ดินที่ใส่ As(V) โดยมีค่าเฉลี่ย 13.92, 13.42 และ 13.25 mg.kg⁻¹ ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของดินพบว่า ดินทุกชุดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การกระจายของข้อมูลพบว่า ดินชุดควบคุมมีการกระจายตัวของข้อมูลมากที่สุด รองลงมาคือดินที่ใส่ As(V) และ As(III) มีความคงที่ของข้อมูลจากการทดลองพบว่า ฟอสฟอรัสมีปริมาณใกล้เคียงกัน ฟอสเฟตมีสมบัติคล้ายอาร์เซนเนตจึงแข่งขันกันในการก่อกำเนิดตำแหน่งเดียวกันในดิน การบำบัดพิษของสารหนูขึ้นกับปริมาณฟอสฟอรัส โดยถ้าความเข้มข้นฟอสฟอรัสต่ำ ทำให้สารหนูมีพิษต่อพืชเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากฟอสฟอรัสเข้าไปแทนที่ได้ดีกว่าในโครงสร้างดิน และผลึกสารหนูออกมา ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ที่ลดลงไปในดินจะไปยับยั้งการเพิ่มฟอสฟอรัสในพืช ส่งผลให้เกิดการดูดสะสมสารหนูมากขึ้นและคงค้างได้ดีกว่า แต่ถ้าฟอสฟอรัสมีความเข้มข้นสูงจะแข่งขันกับสารหนูที่รากและลดความเป็นพิษลง (Woolson, 1975)



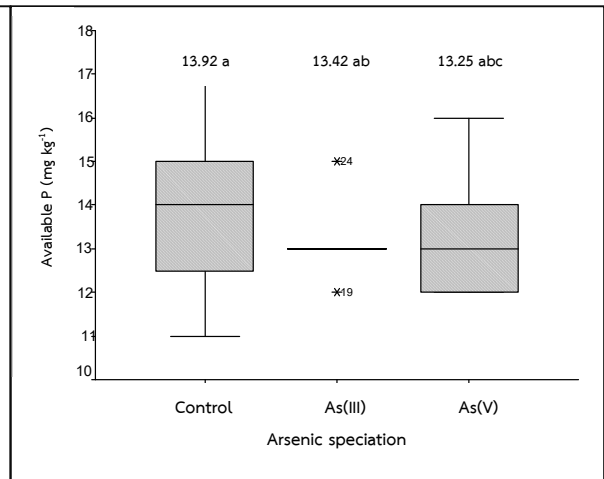
รูปที่ 3 ค่าการสะสมสารหนูทั้งหมด (mg.kg⁻¹) ของ พุทธรักษา (*C. glauca*)



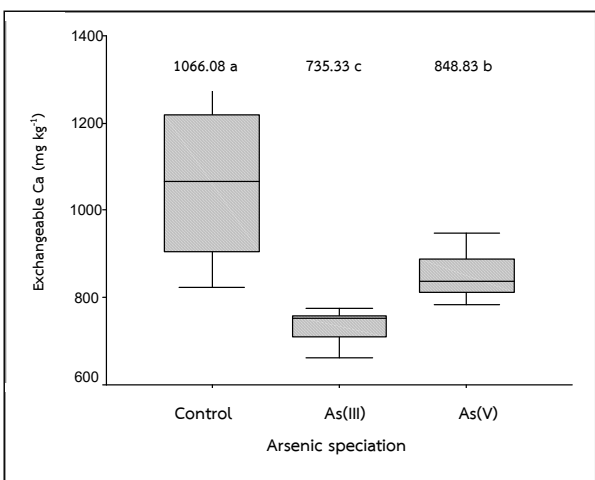
รูปที่ 4 ค่าเฉลี่ยของเหล็ก (mg.kg⁻¹) ที่สกัดได้ในดิน



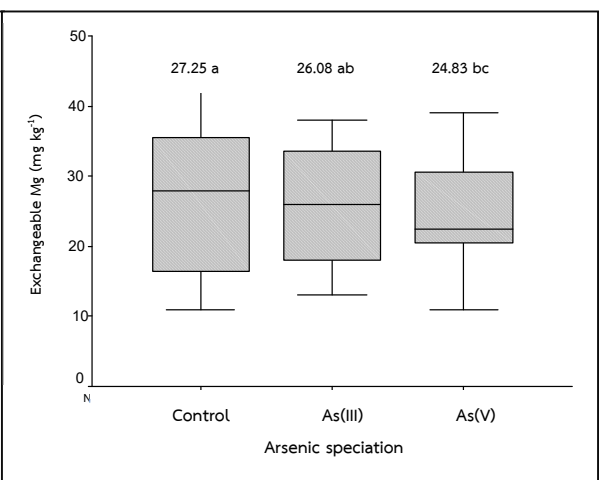
รูปที่ 5 ค่าเฉลี่ยของอะลูมิเนียม (mg.kg⁻¹) ที่แลกเปลี่ยน ได้ของดิน



รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยของฟอสฟอรัส (mg.kg⁻¹) ที่เป็น ประโยชน์ของดิน



รูปที่ 7 ค่าเฉลี่ยของแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน



รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยของแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

จากรูปที่ 7 เมื่อเรียงลำดับค่าเฉลี่ยของแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินแต่ละชุดพบว่า ดินชุดควบคุม > ดินที่ใส่ As(V) > ดินที่ใส่ As(III) โดยมีค่าเฉลี่ย 1066.08, 848.83 และ 735.33 mg.kg⁻¹ ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของดินพบว่า ดินทุกชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) การกระจายของข้อมูลพบว่า ดินชุดควบคุมมีการกระจายตัวของข้อมูลมากที่สุด และดินที่ใส่ As(V) มีการกระจายของข้อมูลมากกว่า As(III) จากการทดลองแคลเซียมดินชุดควบคุมมีแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้สูงกว่าดินที่ใส่อาร์เซนิตและอาร์เซเนต โดยอาร์เซนิตมีปริมาณแคลเซียมต่ำที่สุด แคลเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ซึ่งเป็นรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ ปริมาณแคลเซียมจะแลกเปลี่ยนไปมาระหว่างแคลเซียมในสารละลายดินและในเฟสที่ดูดซับ แหล่งแคลเซียมจะมาจากแร่ธาตุในดิน โดยดินในสภาวะเป็นกรดจะมีแคลเซียมต่ำ แคลเซียมจะลดการเคลื่อนย้ายสารหนูในดินโดยการก่อตัวของตะกอนแคลเซียม – สารหนู (Ca – As precipitate) ซึ่งละลายได้น้อย โดยจะเกิดที่พีเอชสูง ซึ่งจะเกิดตะกอนของแคลเซียมอาร์เซนิต (CaHAsO₃) และแคลเซียมอาร์เซเนต [Ca₃(AsO₄)₂] ตะกอนเหล่านี้จะลดการชะสารหนูในดิน (Bothe and Brown, 1999; Deok et al., 2004; Shree, 2018)

จากรูปที่ 8 เมื่อเรียงลำดับค่าเฉลี่ยของแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินแต่ละชุดพบว่า ดินชุดควบคุม > ดินที่ใส่ As(III) > ดินที่ใส่ As(V) โดยมีค่าเฉลี่ย 27.25, 26.08 และ 24.83 mg.kg⁻¹ ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของดินพบว่า ดินชุดควบคุมอยู่กลุ่มเดียวกับดินที่ใส่ As(III) และดินที่ใส่ As(III)

อยู่ในกลุ่มเดียวกับดินที่ใส่ As(V) ซึ่งทั้งสองกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) การกระจายของข้อมูลพบว่า ดินชุดควบคุมมีการกระจายตัวของข้อมูลมากที่สุด และดินที่ใส่ As(III) มีการกระจายของข้อมูลน้อยกว่า As(V) จากการทดลองพบว่า แมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีปริมาณใกล้เคียงในดินชุดทดลองและชุดควบคุม โดยทั่วไปพืชดูดสะสมแมกนีเซียมน้อยกว่าแคลเซียม แมกนีเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้เป็นรูปที่เป็นธาตุอาหารของพืช ปริมาณแมกนีเซียมในดินจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเริ่มเป็นกลาง ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมแปรผกผันกับอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน การตกตะกอนระหว่างสารหนู – แมกนีเซียม ลดปริมาณสารหนูชนิดอาร์เซนิตและอาร์เซเนตที่ละลายได้ไปเป็นรูปที่ไม่ละลาย รวมทั้งสารหนูจะถูกดูดซับบนผิวของตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ [Mg(OH)₂] โดยประสิทธิภาพในการตกตะกอนและการดูดซับอาร์เซนิตมากกว่าอาร์เซนิต พีเอช ≤ 7.5 (Ghosh et al., 2003)

3.3 การเปรียบเทียบปริมาณการสะสมสารหนูทั้งหมด (Total arsenic) ของพืชรักษาในดินที่ใส่อาร์เซนิตและอาร์เซเนตในวันเพาะปลูกที่แตกต่างกัน

จากตารางที่ 1 ชนิดของสารหนูในดินเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแต่ละกลุ่ม (Multiple comparison) โดยวิธีของดันเนตต์ (Dunnett's T3) พบว่า มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของพืชรักษาอย่างมีนัยสำคัญ (P-value = 0.000) โดยเรียงตามลำดับคือ As(V) > As(III) > control และ 15 > 30 > 45 > 60 วันตามลำดับ

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบปริมาณการสะสมสารหนูทั้งหมดของพืชรักษา (mg.kg⁻¹) ในชนิดสารหนูและเวลาเพาะปลูกที่แตกต่างกัน

ชนิดสารหนู	ปริมาณสารหนูทั้งหมดของพืชรักษา (mg kg ⁻¹)			
	15 วัน	30 วัน	45 วัน	60 วัน
ชุดควบคุม	2 ^{c/a}	1 ^{c/ab}	1 ^{c/ab}	1 ^{c/ab}
อาร์เซนิต [As(III)]	84 ^{b/d}	128 ^{b/b}	111 ^{b/c}	135 ^{b/a}
อาร์เซเนต [As(V)]	90 ^{a/d}	137 ^{a/c}	155 ^{a/b}	157 ^{a/a}

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยอักษรตัวหน้าแสดงความแตกต่างแนวสดมภ์ของชนิดสารหนูตามวันที่เพาะปลูก และอักษรตัวหลังแสดงความแตกต่างแนวแถวของวันเพาะปลูกตามชนิดของสารหนู (P-value = 0.05)

3.4 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์และการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณของปัจจัยที่ส่งผลการดูดสะสมสารหนูทั้งหมด (Total arsenic) ของพุทธรักษา

จากตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดสะสมสารหนูของต้นพุทธรักษาพบว่า ชนิดของสารหนูและพีเอชมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ (p - value = 0.905 และ 0.432) และศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชัน อะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ และแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีความสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญ (p - value = -0.414, -0.329 และ -0.625 ตามลำดับ) เมื่อพิจารณาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระมีค่าน้อยกว่า 0.80 ตามเกณฑ์ของ Stevens (1992) ยกเว้นปัจจัยชนิดของสารหนู ซึ่งแสดงว่า ไม่เกิดปัญหาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระมีค่าสูงหรือไม่เป็นอิสระต่อกัน (multicollinearity) ตัวแปรปัจจัยนำมาพยากรณ์ได้ดี และสามารถนำไปวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณได้

จากตารางที่ 3 แสดงค่าผลการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ ตัวแปรเกณฑ์คือ ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่ต้นพุทธรักษาดูดสะสมไว้ ตัวแปรอิสระที่มีผลการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของต้นพุทธรักษาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p - value < 0.01) ได้แก่ ชนิดของสารหนู จำนวนวันที่เพาะปลูก พีเอช ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชัน เหล็กที่สกัดได้ในดิน แคลเซียมและอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ และพบว่า การตรวจสอบปัญหาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระมีค่าสูงหรือไม่เป็นอิสระต่อกัน

(multicollinearity) จากข้อกำหนดค่า Variance inflation factor (VIF) ต้องมีค่าไม่เกิน 10 ที่แสดงว่า ตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งชนิดของสารหนูมีค่า VIF ไม่เกิน 10 เช่นกัน จึงนำมาพิจารณาร่วมด้วย โดยพบว่า จากการทดลอง VIF มีค่าอยู่ระหว่าง 1.524 - 6.923 ซึ่งนับได้ว่า ตัวแปรมีความสัมพันธ์กันน้อยเป็นอิสระต่อกันไม่เกิดปัญหาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระมีค่าสูงหรือไม่เป็นอิสระต่อกัน (multicollinearity) ปัจจัยด้านเคมีกายภาพและแร่ธาตุที่เกี่ยวข้องในดิน สามารถร่วมกันพยากรณ์เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดได้ร้อยละ 96 โดยมีค่า R^2 adj = 0.960 เมื่อนำตัวแปรพยากรณ์มาเขียนสมการได้ดังนี้ ค่าสะสมสารหนูทั้งหมดของพุทธรักษา = $-451.66^{**} + 60.41(\text{Speciation})^{**} + 35.66(\text{Day})^{**} + 22.51(\text{pH})^{**} - 0.50(\text{Eh})^{**} + 0.29(\text{Extractable Fe})^{**} - 0.05(\text{Exchangeable Ca})^{**} + 777.39(\text{Exchangeable Al})^{**}$ จากสมการพบว่า สารหนูอนินทรีย์ถูกตรึงอยู่ในดินมาก โดยพิจารณาจากค่าคงที่ของสมการ (constant value) ที่มีค่าเท่ากับ -451.66 โดยอาร์เซนถูกดูดสะสมจากพุทธรักษาดีกว่าอาร์เซนไนต์และเมื่อจำนวนวันในการเพาะปลูกเพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดสะสมเพิ่มขึ้น ขณะที่พุทธรักษา มีแนวโน้มที่จะดูดสะสมเมื่อพีเอชเป็นกลางถึงเป็นด่างเล็กน้อย และมีสภาพรีดักชัน แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้หากมีปริมาณมากจะลดการดูดสะสมลง ขณะที่เหล็กที่สกัดได้หากมีเพิ่มขึ้นจะส่งผลบวกในการดูดสะสม เช่นเดียวกับอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สัน

Pearson	Total As	Specia tion	Day	pH	Eh	Al	Ca	Mg	Fe	P
Total As	1									
Speciation	0.905**	1								
Day	0.232	0.000	1							
pH	0.432**	0.336*	0.376*	1						
Eh	-0.414**	-0.330*	0.089	0.376*	1					
Exchangeable Al	-0.329*	-0.271	-0.688**	-0.096	0.230	1				
Exchangeable Ca	-0.625**	-0.509**	-0.235	-0.302*	0.104	0.246	1			
Exchangeable Mg	-0.104	-0.110	0.211	0.225	0.183	-0.229	0.079	1		
Extractable Fe	0.023	0.163	-0.881**	-0.265	-0.137	0.599**	0.053	-0.322*	1	
Available P	-0.245	-0.184	-0.495**	-0.139	-0.087	0.355*	0.482**	0.111	0.468**	1

หมายเหตุ: ** มีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 และ * มีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ถดถอยแบบขั้นตอนหาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของต้นพุทธรักษา

Variable	b	SE	β	t	P - value	VIF
(Constant)	-451.66	71.784		-6.292	0.000	
Speciation	60.41	4.645	0.69	13.004	0.000	2.461
Day	35.66	5.690	0.56	6.267	0.000	6.923
pH	22.51	7.364	0.15	3.056	0.005	2.187
Eh	-0.50	0.080	-0.27	-6.273	0.000	1.667
Extractable Fe	0.29	0.073	0.32	4.021	0.000	5.327
Exchangeable Ca	-0.05	0.017	-0.12	-2.945	0.006	1.524
Exchangeable Al	777.39	270.716	0.16	2.872	0.008	2.804

R = 0.984, R² = 0.968, R² adj = 0.960, f = 8.246, P-value = 0.008, Dubin – Watson = 1.225

4. สรุปผลการวิจัย

สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของพุทธรักษาพบว่า ชนิดของสารหนู พีเอช ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชัน อะลูมิเนียมและแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ สมการพยากรณ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของพุทธรักษาจากทั้งหมด 9 ปัจจัยพบว่า 7 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของพุทธรักษา สามารถเขียนเป็นสมการพยากรณ์ได้ ดังนี้ ค่าสะสมสารหนูทั้งต้นของพุทธรักษา = $-451.66 + 60.41$ (ชนิดของสารหนู) + 35.66 (จำนวนวันที่เพาะปลูก) + 22.51 (พีเอช) - 0.50 (ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชัน) + 0.29 (เหล็กที่สกัดได้ในดิน) - 0.05 (แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้) + 777.39 (อะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้) โดยพุทธรักษาดูดสะสมอาร์เซนเดตได้ดีกว่าอาร์เซไนต์ การดูดสะสมเพิ่มตามจำนวนวันที่เพาะปลูกใน 60 วันของการทดลอง และพีเอชเป็นกลางถึงด่างเล็กน้อย ในสภาพรีดักชันไม่รุนแรง เหล็กในรูปที่สกัดได้ในดินหากมีเพิ่มขึ้นจะทำให้การดูดสะสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นรูปที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช รวมทั้งสภาวะที่เพาะปลูกเหล็กจะละลายออกมาได้น้อยจากดิน เนื่องจากพีเอชมากกว่า 7 และศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชันไม่รุนแรงมาก โดยหากเหล็กมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจะตกตะกอนสารหนูและกักเก็บไว้ในดินรวมทั้งเกิดผลัดของเหล็ก ซึ่งจะทำให้พืชลดการดูดสะสมสารหนูลง แคลเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่หากมีปริมาณเพิ่มขึ้นจะตกตะกอนสารหนู ทำให้การดูดสะสมในพืชลดลง การเพิ่มปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้จะส่งผลให้พุทธรักษาลดการดูดสะสมสารหนู และอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้มีปริมาณน้อยมากในดินที่ทดสอบ ซึ่งอาจส่งผลต่อ

การเจริญเติบโตของพืช โดยหากมีปริมาณเพิ่มขึ้นจะทำให้การดูดสะสมสารหนูในพืชเพิ่มขึ้น แต่หากมีมากเกินไปจะมีสมบัติคล้ายธาตุเหล็ก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ ดุษฎีบัณฑิต โดยได้รับทุนสนับสนุนจากหลักสูตรสาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม (นานาชาติ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบัณฑิตวิทยาลัยแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเผยแพร่ความรู้ด้านพืชบำบัดในการบำบัดสารหนูให้แพร่หลายออกไป และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ และคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้การสนับสนุนการทำการทดลองจนสำเร็จด้วยดี และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่ายที่ร่วมในงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2562a). มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์ แหล่งข้อมูล: <http://www.pcd.go.th>. ค้นเมื่อวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2562.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2562b). มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน. แหล่งข้อมูล: <http://www.pcd.go.th>. ค้นเมื่อวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2562.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2562c). มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม. <http://www.pcd.go.th>. ค้นเมื่อวันที่ 15 พฤษภาคม 2562.
- จอมจันทร์ นทีวัฒนา ศิริเพ็ญ ตรีชัยยาพร ประศักดิ์ อวารยุดิการณ และสมพร ชุนทลือชานนท์. (2562). การศึกษาคุณสมบัติการเป็นพืชบำบัดสารหนูในดินน้ำขังของต้นพุทธรักษา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 21(1): 84 – 94.
- จอมจันทร์ นทีวัฒนา ศิริเพ็ญ ตรีชัยยาพร มะลิวัลย์แช่อ้อย ประศักดิ์ อวารยุดิการณ และสมพร ชุนทลือชานนท์. (2561a). การบำบัดสาร

- หนูชนิดอาร์เซนิตและอาร์เซนเตทไรไฮดรอกไซด์ในดินน้ำขังด้วยบอน. วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้ 9(1): 1 – 15.
- จอมจันทร์ นทีวัฒนา ศิริเพ็ญ ตรีชัยพาพร จินตพัฒน์ นทีวัฒนา มะลิวัลย์ แซ่ อ้อย ประศักดิ์ ถาวรยุติการณ์ และสมพร ชุนท์ลือชานนท์. (2561b). ศักยภาพของกอกอียิปต์ในการดูดสะสมสารหนูอนินทรีย์ชนิดอาร์เซนิตและอาร์เซนเตทไรไฮดรอกไซด์ในดินน้ำขัง. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 27(1): 1 – 17.
- จอมจันทร์ นทีวัฒนา ศิริเพ็ญ ตรีชัยพาพร จินตพัฒน์ นทีวัฒนา มะลิวัลย์ แซ่ อ้อย ประศักดิ์ ถาวรยุติการณ์ และสมพร ชุนท์ลือชานนท์. (2561c). การบำบัดสารหนูชนิดอาร์เซนิต $As(III)$ และอาร์เซนเตทไรไฮดรอกไซด์ $As(V)$ ในดินน้ำขังโดยใช้รูปฤๅษี. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 46(3): 506 – 516.
- ณัฐพล ศรีอำไพ สมชัย อนุสนธิ์พรเพิ่ม อัญชลี สุทธิประการ และศุภิภา ธาระจิตต์. (2554). สมบัติและร้อยละความอิ่มตัวของอะลูมิเนียมในดินที่สูงพื้นที่ขุนวางและดอยอินทนนท์ จ.เชียงใหม่. แก่นเกษตร 39: 209 – 220.
- ปัทมา วิทยากร. (2547). ความอุดมสมบูรณ์ของดินชั้นสูง. ขอนแก่น: ภาควิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- วัชรโรบล สิทธิวิไล. (2554). ศักยภาพของสาบเสือในการบำบัดดินปนเปื้อนตะกั่ว และการใช้สาบเสือที่ผ่านการบำบัดดินเพื่อควบคุมไส้เดือนฝอยรากลปม. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. นครปฐม: 102 หน้า
- Abdul, R., John, R., and George, E. (2001). Soil and plant laboratory manual. 2nd ed, Islamabad, Pakistan: National Agricultural Research Center.
- Adriano, D. C. (2001). Trace elements in terrestrial environments, Biogeochemistry, bioavailability and risks of metals. New York: Springer.
- American Water Work Association Water Environment Federation. (1998). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th. New York. Publication office: American Public Health Association.
- Beck, R. (1999). Soil analysis handbook of reference methods. USA: Soil and Plant Analysis Council, Inc. CRC Press.
- Bothe, J., James, V., and Brown, P. W. (1999). Arsenic immobilization by calcium arsenate formation. Environmental Science & Technology 33: 3806.
- Cheng, H., Hu, Y., Luo, J., and Zhao, J. (2008). Geochemical processes controlling fate and transport of arsenic in acid mine drainage (AMD) and natural systems. Journal of Hazardous Material 165: 13 – 26.
- Deok, H. M., Dimitris, D., and Nektaria, M. (2004). Arsenic immobilization by calcium - arsenic precipitates in lime treated soils. Science of the Total Environment 330: 171 – 185.
- Dickinson, N. M., Baker, A. J. M., Doronilla, A., Laidlaw, S., and Reeves, R. D. (2009). Phytoremediation of inorganics: realism and synergies. International Journal of Phytoremediation 11: 97 – 114.
- Dion, E. G., Mamata, M., Touma, B. I., Shashi, A., and Pritam, S. (2011). Iron and aluminium based adsorption strategies for removing arsenic from water. Journal of Environmental Management 92: 3011 – 3022.
- Fitz, W. J., and Wenzel, W. W. (2002). Arsenic transformations in the soil – rhizosphere – plant system: fundamentals and potential application to phytoremediation, Journal of Biotechnology 99: 259 – 278.
- Ghosh, B., Das, M. C., Gangopadhyay, A. K. Das, T. B., Singh, K., Lal, S., Mitra, S., Ansari, S. H., Goswami, T. K., Chakraborty, S. K., and Banerjee, N. N. (2003). Removal of arsenic from water by coagulation treatment using iron and magnesium salt. Indian Journal of Chemical Technology 10: 87 – 95.
- Gräfe, M., and Sparks, D. L. (2006). Solid phase speciation of arsenic. Collingwood: CSIRO Pub. pp 75 – 92.
- Lin, Z., and Puls, R. W. (2000). Adsorption, desorption, and oxidation of arsenic affected by clay minerals and aging processes. Environmental Geology 39: 753 – 759.
- Liu, W. J., Zhu, Y. G., Smith, F. A., and Smith, S. E. (2004). Do iron plaque and genotypes affect arsenate uptake and translocation by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture? Journal of Experimental Botany 55: 1707 – 1713.
- Liu, W. J., Zhu, Y. G., and Smith, F. A. (2005). Effects of iron and manganese plaques on arsenic uptake by rice seedling (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture supplied with arsenate and arsenite. Plant Soil 277: 127 – 138.
- Mandal, B. K., and Suzuki, K. T. (2002). Arsenic round the world: a review. Talata 58: 201 – 235.
- Mench, M., Schwitzguébel, J. P., Schroeder, P., Bert, V., Gawronski, S., and Gupta, S. (2009). Assessment of successful experiments and limitations of phytotechnologies: contaminant uptake, detoxification, and sequestration, and consequences to food safety. Environmental

- Science and Pollution Research International 16: 876 – 900.
- Pourbaix diagrams. (2562). Simplified Pourbaix diagram for 1 M iron solutions. แหล่งข้อมูล: <http://www.pcd.go.th>. ค้นเมื่อวันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2562.
- Sadiq, M. (1997). Arsenic chemistry in soils: an overview of thermodynamic prediction and field observations. *Water, Air, & Soil Pollution* 93: 117 – 136.
- Shree, J. D. (2018). Calcium (Ca): Forms, Sources and Behavior/ Soil. แหล่งข้อมูล: www.soilmanagementindia.com. ค้นเมื่อวันที่ 4 พฤษภาคม 2561.
- Smedley, P. L. and Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behavior, and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry* 17: 517- 568.
- Stevens, J. (1992). *Applied multivariate statistics for the social sciences*. 2nd ed., Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum Associate, Inc.
- WHO. (2000). *Air Quality Guidelines*. 2nd ed., Regional Office for Europe, Copenhagen.
- Woolson, E. A. (1975). Bioaccumulation of arsenicals. In: Woolson, E. A. (Ed.), *Arsenical Pesticides*. ACS Symposium Series, vol.7. American Chemical Society, Washington, D. C. 97 – 107.

