การบำบัดสารหนูชนิดอาร์เซไนต์และอาร์เซเนต ที่ใส่ในดินน้ำขังด้วยบอน

จอมจันทร์ นทีวัฒนา[1*] ศิริเพ็ญ ตรัยไชยาพร[2] มะลิวัลย์ แซ่อุ้ย[3,5] ประศักดิ์ ถาวรยุติการณ์[4] และสมพร ชุนห์ลือชานนท์[5]

[1]สหสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (นานาชาติ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330
[2]ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200
[3]โครงการจัดตั้งวิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล อำนาจเจริญ 37000
[4]ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200
[5]ภาควิชาปฐพีศาสตร์และอนุรักษ์ศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200
[*]E-mail: jomjun_102@hotmail.com

รับบทความ: 14 มิถุนายน 2560 ยอมรับตีพิมพ์: 10 พฤษภาคม 2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการดูดสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดของต้นบอนและอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอนในดินที่ปนเปื้อนอาร์เซไนต์ [As(III)] และอาร์เซเนต [As(V)] และศึกษาศักยภาพของบอนในการนำมาเป็นพืชบำบัดสารหนูอนินทรีย์ในดินน้ำขัง รูปแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 × 4 ในแบบแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ โดยมีทรีตเมนต์คอมบิเนชั่นเท่ากับ 12 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ประกอบด้วย 2 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดของสารหนู 2 ทรีตเมนต์ คือ As(III) และ As(V) และชุดควบคุม ระยะเวลาเพาะปลูกพืช ได้แก่ 15 30 45 และ 60 วัน ผลการศึกษาพบว่า เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (two–way ANOVA) ปัจจัยที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของน้ำหนักแห้งที่ลดลง ได้แก่ ชนิดของสารหนู (p–value = 0.000) โดยเมื่อเปรียบเทียบพหุคูณของค่าเฉลี่ยในแต่ละปัจจัยโดยวิธีของดันเนตต์ (Dunnett's T3) พบว่า บอนที่ปลูกใน As(III) มีร้อยละการลดลงของน้ำหนักแห้งมากกว่า As(V) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดของต้นบอน ได้แก่ ชนิดของสารหนู และระยะเวลาที่เพาะปลูก โดยปัจจัยทั้ง 2 มีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ (p–value = 0.000) เมื่อเปรียบเทียบพหุคูณของค่าเฉลี่ยในแต่ละปัจจัย พบว่า As(V) > As(III) > ชุดควบคุม และ 30 > 15 > 45 > 60 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอนอย่างมีนัยสำคัญ (p–value = 0.000) ในรูปแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 × 4 × 4 ในแบบแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ได้แก่ ชนิดของสารหนู จำนวนวันที่เพาะปลูก และอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอน โดยพบว่า 2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมกัน (p–value = 0.000) ได้แก่ ชนิดของสารหนู×จำนวนวันที่เพาะปลูก ชนิดของสารหนู×อวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอน จำนวนวันที่

เพาะปลูก×อวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอน และทั้ง 3 ปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกัน (*p*–value = 0.000) โดยเมื่อเปรียบเทียบพหุคูณของค่าเฉลี่ยในแต่ละปัจจัย พบว่า As(V) > As(III) > ชุดควบคุม, 30 > 15 > 45 > 60 และ ราก > ลำต้น > เหง้า > ใบ ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือดิน พบว่า As(III) มีค่า 0.60 – 0.89 และ As(V) มีค่า 0.25 – 0.36 และปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพ As(III) และ As(V) มีค่าสูงสุดในวันที่ 30 ของการเพาะปลูกเท่ากับ 0.8792 และ 1.0186 ตามลำดับ บอนจึงมีคุณสมบัติเป็นพืชไฮเพอร์แอคคูมิวเลเตอร์ในการดูดสะสม As(V)

คำสำคัญ: บอน สารหนู อาร์เซไนต์ อาร์เซเนต ดินน้ำขัง

Arsenic Remediation of Spiked Arsenite and Arsenate Submerged Soil with *Colocasia esculenta* (L.) Schott

Jomjun Nateewattana[1*], Siripen Trichaiyaporn[2], Maliwan Saouy[3,5], Prasak Thavornyutikarn[4] and Somporn Choonluchanon[5]

[1]Interdepartment of Environmental Management (International), Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand; [2]Department of Biology, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand; [3]Mahidol University Amnatcharoen Campus, Amnatcharoen 37000, Thailand; [4]Department of Chemistry, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand; [5]Department of Soil Science and Conservation, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

[*]E-mail: jomjun_102@hotmail.com

Received: 14 June 2017 Accepted: 10 May 2018

Abstract

The objectives of this research included to study total arsenic accumulation of *Colocasia esculenta* and its various organs in As(III) and As(V) treated submerged soil and to study the potential inorganic arsenic remediation of *C. esculenta* in submerged soil. The experimental design was factorial 3 × 4, CRD plan with 12 treatment combinations and 3 replications. Two factors were arsenic speciation including 2 treatments As(III) and As(V) including a control group, and planting time periods were 15, 30, 45 and 60 days. The result of analyzing variance (two–way ANOVA) showed that the significant factor of dry weight decrease (*p*–value = 0.000) was arsenic speciation. The multiple mean comparison in each factor by Dunnett's T3 method found that *C. esculenta* in As(III) treated soils had more % dry weight decreased than As(V) treated soil. The significant factors of total arsenic accumulation (*p*–value = 0.000) were arsenic speciation and cultivating periods. Both factors had influence each other (*p*–value = 0.000), while tested multiple comparison found that As (V) > As (III) > control and 30 > 15 > 45 > 60. The significant factors of total arsenic accumulation in various organs of *C. esculenta* (*p*–value = 0.000) were arsenic speciation, growing periods and various organs, and two factors had influence each other (*p*–value = 0.000) comprised arsenic speciation × growing periods, arsenic speciation × various organs and growing periods × various organs. In addition, three factors had co–influence effect (*p*–value = 0.000). The multiple comparisons of these factors were As(V) > As(III) > Control, 30 > 15 > 45 > 60, and root > petiole > corm > leaf. Arsenic accumulation

translocation factors (ATF) of As(III) and As(V) were 0.60 – 0.89 and 0.25 – 0.36, respectively. The highest bioconcentration factor (BFC) values of As(III) and As(V) were 0.8792 and 1.0186 at 30 days, respectively. Therefore, *C. esculenta* was hyperaccumulating plants of As(V).

Keywords: *Colocasia esculenta* (L.) Schott, Arsenic, Arsenite, Arsenate, Submerged soil

บทนำ

สารหนูมีเลขอะตอม 33 เป็นธาตุกึ่งโลหะ มีน้ำหนักเชิงอะตอม 74.9216 เป็นธาตุที่เกิดตามธรรมชาติในเปลือกโลกเป็นลำดับที่ 20 พบในทะเลเป็นลำดับที่ 14 และพบมากเป็นลำดับที่ 12 ในร่างกายมนุษย์ สารหนูปรากฏใน 4 สภาวะออกซิเดชั่นได้แก่ +V [อาร์เซเนต (Arsenate)] +III [อาร์เซไนต์ (Arsenite)] –III [อาร์ซีน (Arsine)] และ 0 [อาร์เซนิค (Arsenic)] สารประกอบมากกว่า 245 ชนิดที่มีสารหนูเป็นธาตุองค์ประกอบแหล่งกำเนิดมาจากธรรมชาติและการกระทำของมนุษย์ เช่น การเกษตร อุตสาหกรรม และเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดมลพิษในสิ่งแวดล้อม (Mandal and Suzuki, 2002; Ng, 2005) สารหนูเป็นพิษกับทั้งพืชและสัตว์ โดยเป็นสาเหตุประการหนึ่งที่ก่อความเจ็บป่วยในมนุษย์ พิษของสารหนูมีหลากหลาย และขึ้นกับวาเลนซ์ของสารหนูที่ปรากฏ (arsenic speciation) โดยทั่วไปสารหนูอนินทรีย์มีพิษมากกว่ารูปอินทรีย์ (Meharg and Hartley–Whitaker, 2002; Ng, 2005) การปนเปื้อนสารหนูทั่วโลกที่เป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญยกตัวอย่างเช่น บังคลาเทศมีระดับการปนเปื้อนที่พบ < 0.5 – 2,500 ppb ผู้ได้รับผลกระทบ 30 ล้านคน (BGS and DPHE, 2001) รัฐเบงกอลตะวันตกของอินเดียมีระดับการปนเปื้อน < 10 – 3,200 ppb ผู้ได้รับผลกระทบ 6 ล้านคน (Sun *et al*., 2001) ไต้หวันมีระดับการปนเปื้อน 10 – 1,820 ppb ผู้ได้รับผลกระทบ 5.6 ล้านคน (Kuo, 1968) เวียดนามบริเวณแม่น้ำแดงมีระดับการปนเปื้อน 1 – 3,050 ppb ผู้ได้รับผลกระทบมากกว่า 1 ล้านคน (Berg *et al*., 2001) ชิลีเมืองอัลโตฟากัสตา (Antofagasta) มีระดับการปนเปื้อนที่พบ 100 – 1,000 ppb ผู้ได้รับผลกระทบ 5 แสนคน (Sancha and Castro, 2001) เม็กซิโกเมืองลากูเนน (Lagunen) มีระดับการปนเปื้อนที่พบ 8 – 620 ppb ผู้ได้รับผลกระทบ 4 แสนคน (Del Razo *et al*., 1990) สำหรับประเทศไทยอำเภอร่อนพิบูล จังหวัดนครศรีธรรมราช มีระดับการปนเปื้อนที่พบ 1 – 5,000 ppb ผู้ได้รับผลกระทบประมาณ 15,000 คน (Williams, 1997)

สำหรับวิธีการบำบัดสารหนูที่มีความเข้มข้นสูงจะใช้วิธีการทางกายภาพและเคมีในเบื้องต้น เมื่อมีความเข้มข้นต่ำจึงใช้วิธีการทางชีวภาพ การบำบัดสารหนูจัดจำแนกตามสถานะ ได้แก่ สารหนูในสถานะของแข็งประกอบด้วยการแยกทางกายภาพ การทำให้เป็นของแข็งและการปรับเสถียร สารหนูในสถานะของเหลวประกอบด้วย การดูดซับ/ดูดซึมและการแลกเปลี่ยนประจุ การตกตะกอนหรือการตกตะกอนร่วม การแยกโดยการกรองด้วยเยื่อและการแยกโดยใช้แม่เหล็กเทคนิคกำแพงประดิษฐ์ การบำบัดโดยวิธีทางชีวภาพ ได้แก่ การใช้แบคทีเรียและเชื้อรา การใช้พืชในการบำบัด และวิธีธรรมชาติบำบัด สารหนูในสถานะแก๊ส ได้แก่ การปรับเสถียร และเครื่องดัก

ฝุ่น (Dermont *et al*., 2008; Leist *et al*., 2000; Mulligan *et al*., 2001; Nateewattana, 2012; Nateewattana, 2014; Su and Puls, 2001)

การบำบัดโดยวิธีพืชบำบัดเป็นวิธีที่ประหยัดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ชนิดและกลไกของพืช สมบัติของดิน รูปแบบและชนิดของสารมลพิษในดิน สภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศ สภาพทางอุทกธรณีวิทยา กระบวนการพืชบำบัดสารมลพิษมีดังนี้ พืชดูดสะสมสารมลพิษผ่านตัวกลางสิ่งแวดล้อมไปเก็บในส่วนต่าง ๆ ของพืช หรือการทำให้สารมลพิษระเหย การย่อยสลายหรือทำลายสารมลพิษด้วยจุลินทรีย์บริเวณรากพืช การเปลี่ยนแปลงสภาพทางเคมีในดินด้วยพืช โดยปรับสภาพสารมลพิษที่ปนเปื้อนให้มีพิษลดลง พืชจะตรึงสารมลพิษหรือลดการเคลื่อนย้ายสารมลพิษ จากนั้นเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่มีความเสถียร โดยส่งผลให้ไม่สามารถเคลื่อนที่หรือเคลื่อนที่ได้น้อยลง แล้วจึงย่อยสลายไปในที่สุด ข้อดีของวิธีพืชบำบัด คือ ใช้ได้บริเวณกว้าง ค่าใช้จ่ายน้อย ไม่ต้องเคลื่อนย้ายดินออกจากพื้นที่ มีผลกระทบน้อย และปลอดภัยมากกว่าวิธีอื่น ๆ การดูดสะสมของพืชสามารถสกัดสารมีค่าบางชนิด เช่น โลหะหนักกลับมาใช้ใหม่หรือนำไปขาย อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงบำรุงดินและปรับภูมิทัศน์ ข้อจำกัดคือ บำบัดได้แต่บริเวณรากพืชไปถึง มีข้อจำกัดทางภูมิศาสตร์สูง การเลือกพืชที่เหมาะสมต่อสารพิษแต่ละชนิดยังมีการศึกษาน้อย และการบำบัดใช้เวลานาน (Sampanpanish, 2015)

บอนเป็นพืชที่มีความเหมาะสมหลายประการในการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในดินน้ำขัง โดยบอนเป็นพืชในวงศ์ Araceae กระจายทั่วไปในเขตร้อน เจริญเติบโตได้ดีในดินน้ำขัง มีลำต้นใต้ดินลักษณะเป็นเหง้า ต้นสูงประมาณ 0.7–1.2 เมตร มีลักษณะเป็นพืชหัวคล้ายเผือกหรือมัน มีรากฝอยรอบหัวและมีหน่อที่จะงอกเป็นต้นใหม่ ใบรูปไข่แกมหัวใจ ปลายใบแหลมหรือมน โคนใบเว้าแหลม ใบมีไขเคลือบอยู่ ก้านใบสีเขียวหรืออมม่วง ดอกมีลักษณะเป็นช่อดอก มีสีเหลืองนวล ดอกตัวผู้อยู่ด้านบน ส่วนดอกตัวเมียอยู่ด้านล่าง เป็นไม้ล้มลุกอายุหลายปี (Bunmee, 2010)

วัตถุประสงค์ในการวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาการดูดสะสมสารหนูอนินทรีย์ชนิด As(III) และ As(V) ในดินน้ำขังของบอนและอวัยวะส่วนต่าง ๆ ในรูปการดูดสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมด และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดสะสมใน 4 ระยะเวลาเพาะปลูกได้แก่ 15 30 45 และ 60 และศึกษาความเหมาะสมของคุณลักษณะการเป็นพืชบำบัดสารหนูอนินทรีย์ของบอน

วิธีการวิจัย

การเตรียมตัวอย่างพืชและดิน

ต้นบอนและดินน้ำขังที่ใช้ในการทดลองเก็บจากพื้นที่ตามธรรมชาติที่ไม่มีการปนเปื้อนในเขตอำเภอหางดง จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งได้วิเคราะห์ปริมาณสารหนูทั้งหมดก่อนนำมาทดลอง โดยนำต้นบอนมาอนุบาลในโรงเรือนเป็นระยะเวลา 2 เดือน ส่วนดินน้ำขังใช้ดินนา นำมาตากลมให้แห้ง แล้วจึงนำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm แล้วจึงชั่งน้ำหนักถุงละ 5 กิโลกรัม นำมาบ่มกับไดโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซเนต (disodium hydrogen arsenate, $Na_2HAsO_4{\cdot}7H_2O$) และโซเดียมอาร์เซไนต์ (sodium arsenite, $NaAsO_2$) ให้มีความเข้มข้น 175 $mg{\cdot}kg^{-1}$ นำมาเตรียมปลูกพืชในกระถางขนาด 12 × 12 นิ้ว และระดับน้ำในกระถางให้คงที่ที่ระดับ 2 cm เหนือผิวดิน

การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างดินจากทุกกระถางตามแผนการทดลอง ได้แก่ 15 30 45 และ 60 วัน ที่ระดับต่ำกว่าผิวดิน 15 cm และนำไปอบที่ 70°C จนน้ำหนักคงที่ นำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm เก็บในถุงพลาสติกแห้งและปิดสนิท เก็บตัวอย่างพืชมาล้างด้วยน้ำสะอาด และเช็ดให้แห้ง ชั่งน้ำหนักทั้งต้น แล้วจึงแยกส่วนใบ ลำต้น ราก และเหง้ามาชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปอบให้แห้งที่ 85°C จนน้ำหนักคงที่แล้วเก็บตัวอย่างในถุงพลาสติกแห้งปิดสนิท

การย่อยตัวอย่างดิน ชั่งดินที่บดและร่อนแล้ว 0.500 g ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 mL เติมกรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3) 7 mL และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% H_2O_2) 2 mL ทิ้งไว้ 6 ชั่วโมง นำไปย่อยที่ 85°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 25 mL ด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) เก็บในขวดเฮชดีพีอี (high density polyethylene, HDPE)

การย่อยพืช ชั่งพืชที่บดแล้ว 0.5000 g ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 mL เติมกรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3) 7 mL ทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% H_2O_2) 2 mL ทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำไปย่อยที่ 85°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตร 25 mL เก็บในขวดพลาสติกชนิดเฮชดีพีอี

การตรวจวัดสารหนูแบบปริมาณสารหนูทั้งหมด (total arsenic): เตรียมสารมาตรฐานหรือตัวอย่างจำนวน 10 mL จากนั้นเติม 6 mL ของ HCl : H_2O_2 (1:1) และเติม 1 mL ของ 10% KI (analytical reagent grade) ผสมให้เข้ากันและทิ้งให้เกิดปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ตรวจวัดด้วยวิธี hydride –atomic absorption spectrophotometer (AAS) ตรวจสอบความเที่ยงตรงและแม่นยำโดยใช้ reagent blanks และ internal standards โดย detection limit ของวิธีนี้คือ 1 $\mu g \cdot As \cdot kg^{-1}$ หรือ $\mu g\ As \cdot L^{-1}$ (America Water Work Association Water Environment Federation, 1998) ในการทดลองวัดค่ากรด–เบสของดินด้วยเครื่อง pH meter (Takemura รุ่น DM-13) และวัดค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน–รีดักชันของดินด้วยเครื่อง Eh meter (Hanna รุ่น HI98331)

การคำนวณและวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติ

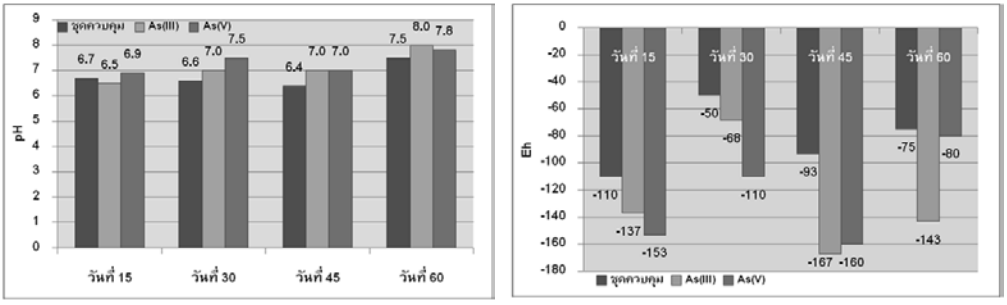
การเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือดิน (arsenic accumulation translocation factor, ATF) เป็นสัดส่วนระหว่างปริมาณสารหนูในส่วนเหนือดินต่อปริมาณสารหนูในส่วนใต้ดิน การคำนวณความเข้มข้นทางชีวภาพ (bioconcentration factor, BCF) เป็นสัดส่วนระหว่างปริมาณสารหนูในพืชต่อปริมาณสารหนูในดิน สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลได้แก่ การวิเคราะห์ความแปรปรวนพหุนาม (ANOVA) และการเปรียบเทียบพหุคูณของแต่ละปัจจัยโดยวิธีของดันเนตต์ (Dunnett's T3)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลของ As(III) และ As(V) ต่อน้ำหนักแห้ง

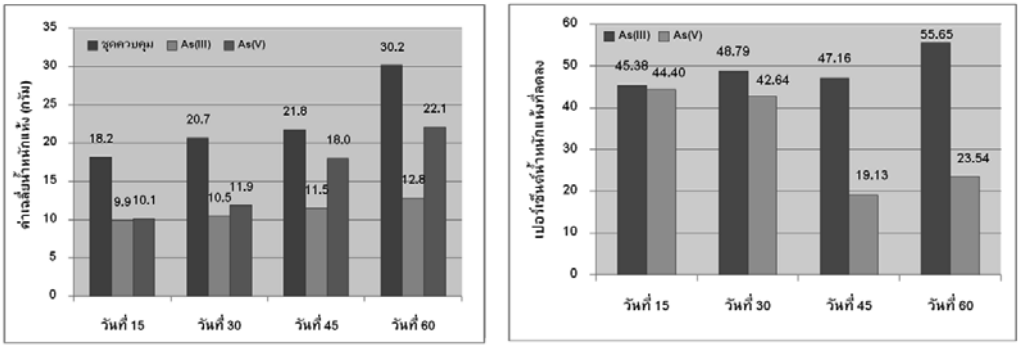
ภาพที่ 1ก และ 1ข แสดงผลการวัดค่า pH และ Eh ในดินพบว่า pH ชุดควบคุมมีค่า 6.4 – 7.5 As(III) มีค่า 6.5 – 8.0 และAs(V) มีค่า 6.9 – 7.8 และค่า Eh ชุดควบคุมมีค่า –110 ถึง –50 As(III) มีค่า –167 ถึง –68 As(V) มีค่า –160 ถึง –80 ภาพที่ 2ก แสดงค่าเฉลี่ยน้ำแห้งที่ปลูกใน As(III) และ As(V) ภาพที่ 2ข แสดงร้อยละของ

น้ำหนักแห้งที่ลดลงของบอน พบว่า พืชที่ปลูกใน As(III) มีน้ำหนักแห้งน้อยกว่า As(V) และชุดควบคุม และ As(III) มีร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงมากกว่า As(V) จากตาราง 1 เมื่อทดสอบความแปรปรวน (two–way ANOVA) ปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของน้ำหนักแห้งอย่างมีนัยสำคัญ (p–value = 0.000) คือ ชนิดของสารหนู และเมื่อเปรียบเทียบพหุคูณของค่าเฉลี่ยแต่ละปัจจัยโดยวิธีของดันเนตต์ (ภาพที่ 3) พบว่า As(III) มีค่าเฉลี่ยของร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงเท่ากับ 45.32% และ As(V) มีค่าเท่ากับ 37.77% พิษจากสารหนูส่งผลต่อพืช โดยขึ้นกับชนิดของพืช ชนิดของสารหนู และความเข้มข้นในดิน พืชบางชนิดจะตายตั้งแต่เริ่มได้รับสารพิษ ส่วนที่รอดจะแคระแกรนและมีอาการ straighthead disease (Quaghebeur and Rengel, 2005) จากการศึกษาของ Wei *et al*. (2006) พบว่า *P. ensiformis* มีน้ำหนักลดลง เมื่อปลูกใน As(V) ที่มีความเข้มข้น 33 และ 267 μM เป็นเวลา 1 5 และ 10 วัน โดยสารหนูจะเข้าไปรบกวนกระบวนการเมแทบอลิซึมของพืช และการดูดตรึงธาตุอาหารของพืช (Meharg and Hartley–Whitaker, 2002)



(ก) (ข)

ภาพที่ 1 สมบัติทางกายภาพของดินที่ใช้ทดลอง (ก) ความเป็นกรด–เบส และ (ข) ศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชัน



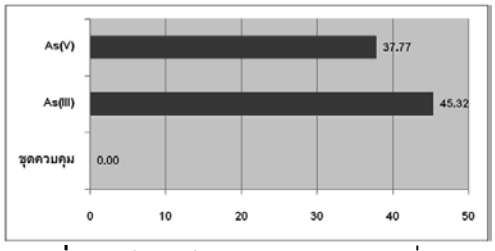
(ก) (ข)

ภาพที่ 2 พารามิเตอร์เกี่ยวกับน้ำหนักของพืชในการทดลอง (ก) ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้ง และ (ข) ร้อยละของน้ำหนักแห้งที่ลดลง

ตาราง 1 วิเคราะห์ความแปรปรวนของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งที่ลดลง

Source	Sum of squares	df	Mean square	*F*	*Sig.*
Corrected Model	14602.94	11	1327.54	17.29	0.000
Intercept	27611.36	1	27611.36	359.69	0.000
Day	216.57	3	72.19	0.94	0.437
Speciation	14147.70	2	7073.85	92.15	0.000
Day × Speciation	238.68	6	39.78	0.52	0.789
Error	1842.32	24	76.76		
Total	44056.62	36			
Corrected Total	16445.26	35			

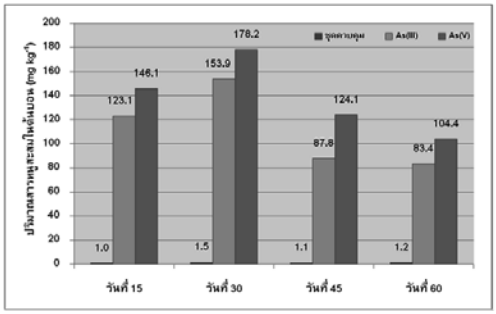
หมายเหตุ R Squared = .888 (Adjusted R Squared = .837)



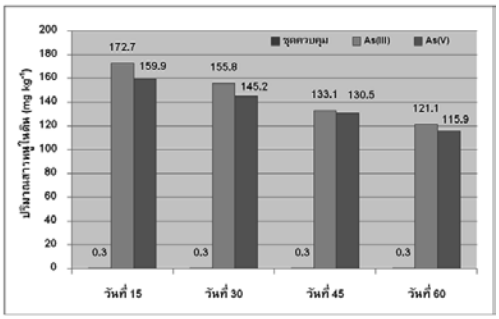
ภาพที่ 3 เปรียบเทียบพหุคูณของค่าเฉลี่ยปัจจัยร้อยละของน้ำหนักแห้งที่ลดลงระหว่างชนิดของสารหนูที่ต่างกัน

2. ผลของ As(III) และ As(V) ต่อการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดของบอน

จากภาพที่ 4ก แสดงปริมาณการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดในต้นบอน (mg·kg^{-1}) ภาพที่ 4ข แสดงปริมาณสารหนูทั้งหมดในดินตัวอย่าง (mg·kg^{-1}) พบว่า As(V) มีการสะสมมากกว่า As(III) ในทุกช่วงเวลาเพาะปลูก และเมื่อทดสอบความแปรปรวน (two–way ANOVA) (ตาราง 2) พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดของบอนอย่างมีนัยสำคัญ (*p*–value = 0.000) ได้แก่ จำนวนวันที่เพาะปลูก และชนิดของสารหนู และทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกัน (*p*–value = 0.000) เมื่อนำปัจจัยที่มีอิทธิพลมาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแต่ละกลุ่มโดยวิธีของดันเนนต์ (ภาพที่ 5ก และ 5ข) พบว่า บอนสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในดินที่ใส่ As(V) มากกว่าAs(III) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 138.08 และ 112.08 mg·kg^{-1} สำหรับปัจจัยจำนวนวันที่เพาะปลูก ในวันที่ 30 ของการเพาะปลูกมีการสะสมมากที่สุด รองลงมา ได้แก่ 15 45 และ 60 วัน ตามลำดับ จากการศึกษาของ Jampanil (2000) พบว่า ปัจจัยเวลาการเพาะปลูกและชนิดของบอนมีผลต่อการดูดสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมด และทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกัน โดยศึกษาการดูดสะสมอาร์เซเนตของบอนจีนดำและบอนเขียวที่ความเข้มข้นสารหนูในดิน 50 75 100 125 และ 150 mg·kg^{-1} ระยะเวลาการเพาะปลูก 15 30 45 60 75 และ 90 วัน และจากการศึกษาของ Marin *et al*. (1992) พบว่า ข้าวมีการสะสม As(III) มากกว่า As(V) พืชต่างชนิดกันและปริมาณสารหนูที่แพร่กระจายในดิน มีผลต่อการเคลื่อนย้ายและดูดสะสมสารหนูในพืช (Quaghebeur and Rengel, 2005)

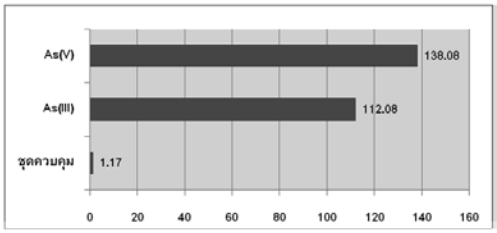


(ก)

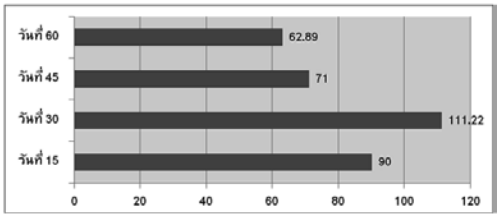


(ข)

ภาพที่ 4 เปรียบเทียบปริมาณสารหนูในบอนและดินตัวอย่าง (ก) ปริมาณสารหนูสะสมของบอน และ (ข) ปริมาณสารหนูในดิน

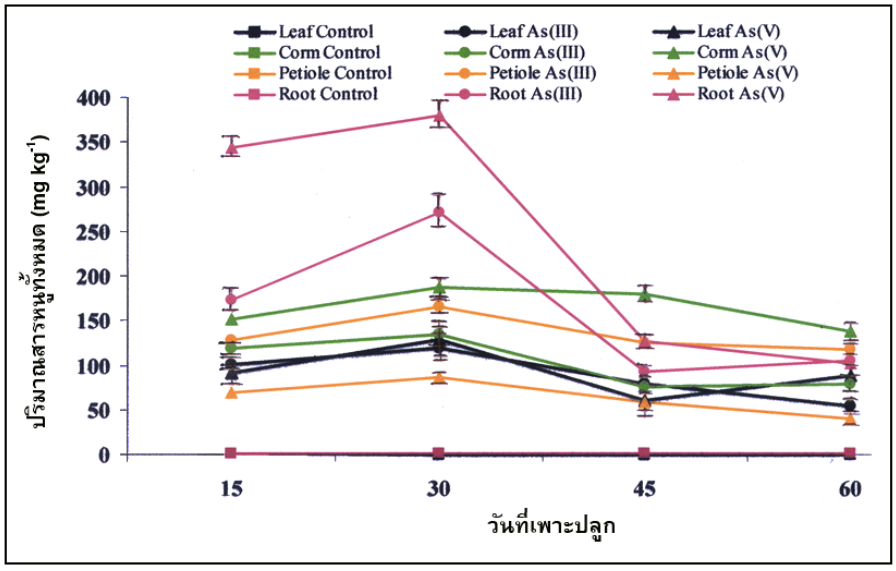


(ก)



(ข)

ภาพที่ 5 เปรียบเทียบพหุคูณของค่าเฉลี่ยปัจจัยการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดที่สะสมของบอน (ก) เปรียบเทียบระหว่างชนิดของสารหนูที่ต่างกัน และ (ข) เปรียบเทียบระหว่างจำนวนวันที่เพาะปลูกที่ต่างกัน



ภาพที่ 6 ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่สะสมในอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอน

ตาราง 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณการสะสมสมสารหนูของบอน

Source	Sum of squares	df	Mean square	*F*	*Sig.*
Corrected Model	145728.22	11	13248.02	815.26	0.000
Intercept	252673.78	1	252673.78	15549.16	0.000
Day	12523.78	3	4174.59	256.90	0.000
Speciation	126898.72	2	63449.36	3904.58	0.000
Day * Speciation	6305.72	6	1050.95	64.67	0.000
Error	390.00	24	16.25		
Total	398792.00	36			
Corrected Total	146118.22	35			

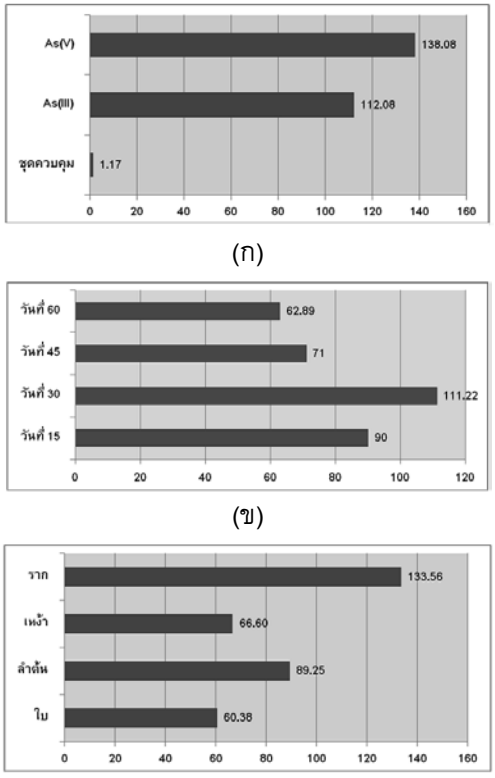
R Squared = .997 (Adjusted R Squared = .996)

3. ผลของ As(III) และ As(V) ต่อการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอน

จากภาพที่ 6 พบว่า รากมีการสะสมมากที่สุดในวันที่ 15 และ 30 สำหรับ As(III) และ As(V) วันที่ 45 และ 60 ลำต้นและเหง้ามีการสะสมมากที่สุดในพืชที่ปลูกดินที่ใส่ As(III) และ As(V) เมื่อทดสอบความแปรปรวน (three–way ANOVA) (ตาราง 3) พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในส่วนต่าง ๆ ของบอนอย่างมีนัยสำคัญ (*p*–value = 0.000) ได้แก่ จำนวนวันที่เพาะปลูก ชนิดของสารหนู และอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอน และปัจจัยร่วม 2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมกันในการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดของอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอนอย่างมีนัยสำคัญ (*p*–value = 0.000) ได้แก่ ชนิดของสารหนู×จำนวนวันที่เพาะปลูก ชนิดของสารหนู×อวัยวะส่วนต่างๆ ของบอน จำนวนวันที่เพาะปลูก×อวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอน รวมทั้งปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ (*p*–value = 0.000) จากภาพที่ 7ก 7ข และ 7ค แสดงค่าการเปรียบเทียบพหุคูณของค่าเฉลี่ยของแต่ละปัจจัยที่มีอิทธิพลโดยวิธีของดันเนตต์ พบว่า วันที่เพาะปลูกเรียงลำดับค่าเฉลี่ยการดูดสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดของอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอน คือ 30 > 15 > 45 > 60 ปัจจัยชนิดของสารหนูพบว่า As(V) > As(III) > ชุดควบคุม สำหรับปัจจัยอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอน พบว่า ราก > ลำต้น > เหง้า > ใบ เมื่อเปรียบเทียบจากการศึกษาของ Jampanil (2000) พบว่า บอนจีนดำและบอนเขียวที่ปลูกในดินที่ใส่ As(V) มีการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในอวัยวะส่วนต่าง ๆ ตามลำดับดังนี้ ราก > เหง้า > ใบ > ลำต้น โดยบอนจีนดำมีการสะสมดีที่สุดในวันที่ 45 ที่ความเข้มข้น 125 $mg \cdot kg^{-1}$ และบอนเขียวมีการสะสมดีที่สุดในวันที่ 90 ที่ความเข้มข้น 150 $mg \cdot kg^{-1}$

การทดสอบใน *Brassica juncea* และ *Helianthus annus* พบว่า As(III) และ As(V) เป็นสารหนูชนิดหลักที่เคลื่อนย้ายไปสู่รากและหัว โดยพืชสะสมใน xylem sap (Pickering *et al*., 2000) พืชบกส่วนใหญ่ดูดสะสม As(V) ที่รากแล้วลดรูปไปเป็น As(III) ซึ่งใน As(III) จะไปสร้างสารประกอบเป็น phytochelatins (Quaghebeur and Rengel, 2005) นอกจากนี้พืชจำพวกเฟิร์นนิยมนำมา

บำบัดสารหนูเพราะมีคุณสมบัติเป็น ไฮเพอร์แอคคูมิวเลเตอร์ มีการสะสมสารหนูมากที่ส่วนที่คล้ายใบ (frond) และไรซอยด์ (rhizoid) โดยกลไกการดูดสะสมสารหนูขึ้นกับชนิดของพืช As(V) จะดูดสะสมผ่านตัวขนส่งเดียวกับฟอสฟอรัส และ As(III) จะดูดสะสมผ่าน aquaglyceroporin (Rahman and Hasegawa, 2011)



ภาพที่ 7 เปรียบเทียบพหุคูณค่าเฉลี่ยปัจจัยการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอน เปรียบเทียบระหว่าง (ก) ชนิดของสารหนูที่ต่างกัน (ข) จำนวนที่เพาะปลูกที่ต่างกัน และ (ค) อวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอนที่ต่างกัน

4. ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูส่วนเหนือดิน (arsenic accumulation translocation factor, ATF) และปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพ (bioconcentration factor, BCF)

จากภาพที่ 8ก แสดงว่า As(III) เคลื่อนย้ายขึ้นสู่ส่วนเหนือดินได้ดีกว่า As(V) ซึ่งจะสะสมในรากและเหง้า โดยพืชบำบัดที่ดีควรมีสมบัติเคลื่อนย้ายสารหนูสู่ส่วนบนได้ดี บอนมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้าย As(III) ซึ่งมีพิษมากกว่าสู่ส่วนบนของลำต้นได้ดี และสะสม As(V) ในรากและเหง้า สำหรับภาพที่ 8ข แสดงค่าปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพสูงสุดของบอนใน As(III) และ As(V) พบว่า As(V) มีค่ามากกว่า 1 คือ 1.0186 ซึ่งแสดงสมบัติเป็นพืชไฮเพอร์แอคคิวมิวเลเตอร์ในวันที่ 30 ของการเพาะปลูกโดยปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพของ As(V) อยู่ระหว่าง 0.5961 – 1.0186 และ As(III) อยู่ระหว่าง 0.4766 – 0.8702 บอนจึงมีเหมาะสมที่จะนำมาบำบัดดินน้ำขังที่ปนเปื้อน As(V) เพราะมีสมบัติเป็นพืชในกลุ่มไฮเพอร์แอคคิวมิวเลเตอร์ สำหรับการดูดสะสมสารหนูในพืชกลุ่มไฮเพอร์แอคคิวมิวเลเตอร์ ได้แก่ พืชจำพวกเฟิร์น เช่น *Pteris vittata* สะสม 23,000 – 27,000 mg·kg^{-1} *Pteris multifida* และ *Agrostis tenerima* ดูดสะสมสารหนู 1,977 และ 1,000 mg·kg^{-1} (Sampanpanish, 2015)

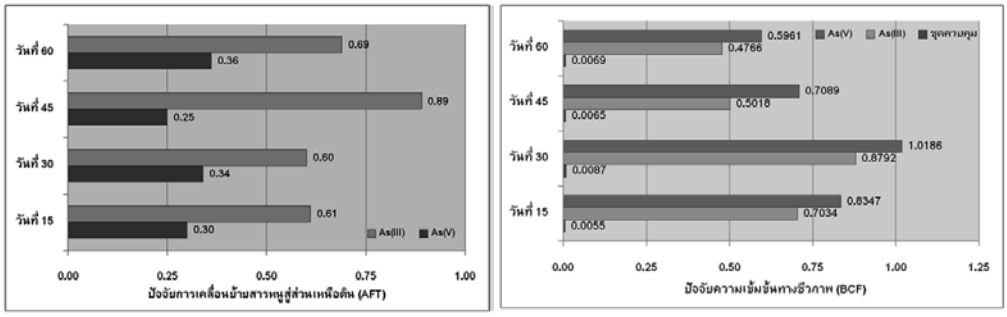
สรุปผลการวิจัย

สารหนูอนินทรีย์ที่ทดลอง 2 ชนิดได้แก่ As(III) และ As(V) ซึ่ง As(III) พบมากในดินน้ำขังที่เป็นสภาวะรีดักชันและมีความเป็นพิษมากกว่า As(V) บอนเป็นพืชที่ขึ้นได้ดีในสภาพน้ำขัง ทนทาน และมวลชีวภาพสูง จึงเป็นพืชทางเลือกที่นำมาศึกษา พบว่า ชนิดของสารหนูมีผลต่ออัตราส่วน

ตาราง 3 วิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมสารหนูในอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอน

Source	Sum of squares	df	Mean square	*F*	*Sig.*
Corrected Model	1085194.41	47	23089.24	404.49	0.000
Intercept	1101182.64	1	1101182.64	19291.20	0.000
Speciation	544345.55	2	272172.77	4768.09	0.000
Day	91664.87	3	30554.96	535.28	0.000
Organ	118669.20	3	39556.40	692.97	0.000
Speciation×Day	48996.39	6	8166.06	143.06	0.000
Speciation×Organ	139979.92	6	23329.99	408.71	0.000
Day×Organ	73590.58	9	8176.73	143.25	0.000
Speciation×Day×Organ	67947.89	18	3774.88	66.13	0.000
Error	5479.89	96	57.08		
Total	2191856.93	144			
Corrected Total	1090674.29	143			

R Squared = 0.995 (Adjusted R Squared = 0.993)



(ก) (ข)

ภาพที่ 8 ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสู่ส่วนเหนือดินและความเข้มข้นทางชีวภาพ (ก) ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสู่ส่วนเหนือดิน (ATF) และ (ข) ปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพ (BCF)

ของน้ำหนักแห้งของบอนอย่างมีนัยสำคัญ โดยบอนที่ปลูกใน As(III) มีร้อยละของน้ำหนักแห้งลดลงมากกว่า As(V) ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดของบอน ได้แก่ ชนิดของสารหนู และจำนวนวันที่เพาะปลูก บอนดูดสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในดินที่ใส่ As(V) มากกว่า As(III) และมีการสะสมเพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง 30 วัน แล้วค่อย ๆ ลดลง และทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกัน และปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอนอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ชนิดของสารหนู จำนวนวันที่เพาะปลูก และอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอนที่มีการสะสมต่างกัน โดยอวัยวะทุกส่วนมีค่าเฉลี่ยการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดจากดินที่ใส่ As(V) มากกว่า As(III) และการสะสมเพิ่มจากวันแรกจนถึงวันที่ 30 แล้วค่อย ๆ ลดลง รากเป็นอวัยวะ

ส่วนที่มีการสะสมสารหนูมากที่สุด ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญได้แก่ ชนิดของสารหนู×จำนวนวันที่เพาะปลูก ชนิดของสารหนู×อวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอน จำนวนวันที่เพาะปลูก×อวัยวะส่วนต่าง ๆ ของบอน และปัจจัยทั้งสามมีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ

ปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือดิน พบว่า As(III) มีการเคลื่อนสู่ส่วนบนมากกว่า As(V) และปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพ พบว่า บอนที่ปลูกในดินที่ใส่ As(V) มีสมบัติเป็นพืชไฮเพอร์แอคคูมิวเลเตอร์ โดยมีปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพมากกว่า 1 ดังนั้นบอนจึงเป็นพืชทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับดินน้ำขังและการเก็บเกี่ยวควรระมัดระวังในส่วนใต้ดิน เพราะจะส่งผลให้เกิดการตกค้างของสารหนูได้ ข้อเสนอแนะการกำจัดพืชที่ผ่านการบำบัดสารหนูในปัจจุบัน ได้แก่ การนำไปทำให้แห้ง บด และทำให้เป็นก้อนแข็งก่อนนำไปฝังกลบแบบปลอดภัย หรือนำไปหมักและย่อยในที่ไร้อากาศ ซึ่งมีผลพลอยได้เป็นพลังงาน แล้วจึงนำกากตะกอนมาทำให้แห้งทำเป็นก้อนแข็ง และทำการฝังกลบแบบปลอดภัยต่อไป ไม่นิยมการกำจัดโดยวิธีการเผา เพราะสารหนูสามารถแพร่กระจายไปในอากาศและกลับเข้าสู่สิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากหลักสูตรสาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม (นานาชาติ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบัณฑิตวิทยาลัย แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต และขอขอบคุณความอนุเคราะห์จากคณะวิทยาศาสตร์และคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้การสนับสนุนการสถานที่ สารเคมี อุปกรณ์ และสิ่งอำนวยความสะดวกในการทดลองจนสำเร็จด้วยดี และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่ายที่ร่วมในงานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างยิ่ง รวมทั้งขอขอบคุณ ดร.นพ.วิชัย เทียนถาวร และคณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

เอกสารอ้างอิง

American Water Work Association Water Environment Federation. (1998). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th ed. New York: American Public Health Association.

Berg, M., Tran, H. C., Nguyen, T. C., Pham, H. V., Schertenleib, R., Giger, W. (2001). Arsenic contamination of groundwater and drinking water in Vietnam: A human health threat. **Environmental Science and Technology** 35: 2621–2626.

BGS and DPHE. (2001). **Arsenic Contamination of Groundwater in Bangladesh.** British: Keyworth.

Bunmee, K. (2010). ***In vitro* tuber induction of Caladium (*Caladium bicolor* VENT.) cv. Motaya**, Master of Science Thesis. Department of Biology, Graduate School, Silpakorn University. (in Thai)

Del Razo, L. M., Arellano, M. A., Cebrián, M. E. (1990). The oxidation states of arsenic in well–water from a chronic arsenicism area of northern Mexico. **Environmental pollution** 64: 143–153.

Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G., Richer–

Laflèche, M. (2008). Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field application. **Journal of Hazardous Materials** 152(1): 1–31.

Jampanil, J. (2000). **Efficiency of arsenic removal from soil by *Colocasia esculenta* (L.) Schott (Dark violet and green)**. Master Thesis in Environmental Science Bangkok: Inter-Departmental Program in Environmental Management, Graduate School of Chulalongkorn University. (in Thai)

Kuo, T. L. (1968). Arsenic content of artesian well water in endemic area of chronic arsenic poisoning. **Report of Department of Pathology and Graduate Institute of National Taiwan University** 20: 7–13.

Leist, M., Casey, R. J., and Caridi, D. (2000). The management of arsenic wastes: problems and prospects. **Journal of Hazardous Materials** 76(1): 125–138.

Mandal, B. K., and Suzuki, K. T. (2002). Arsenic around the world: A review. **Talanta** 58: 201–235.

Marin, A. R., Masscheleyn, P. H., and Patrick, W. H. (1992). The influence of chemical form and concentration of arsenic on rice growth and tissue arsenic concentration. **Plant and Soil** 139: 175–183.

Meharg, A. A., and Hartley–Whitaker, J. (2002). Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and non–resistant plant species. **New Phytologist** 154: 29–43.

Mulligan, C. N., Yong, R. N., and Gibbs, B. F. (2001). Remediation technologies for metal–contaminated soils and groundwater: An evaluation. **Engineering Geology** 60(1–4): 193–207.

Nateewattana, J. (2012).Technology used for environmental arsenic remediation. **Naresuan Phayao Jounal** 5(3): 258–270.

Nateewattana, J. (2014). Arsenic phytoremediation in soil and sediment: Mechanism and management. **KKU Science Journal** 42(4): 730–747. (in Thai)

Ng, J. C. (2005). Environmental contamination of arsenic and its toxicological impact on humans. **Environmental Chemistry** 2: 146–160.

Pickering, I. J., Roger, C. P., Martin, J. G., Robert, D. S., Graham, N. G., and David, E. S. (2000). Reduction and coordination of arsenic in Indian mustard. **Plant Physiology** 122: 1171–1177.

Quaghebeur, M., and Rengel, Z. (2005). Arsenic speciation governs arsenic uptake and transport in terrestrial plants. **Microchimica Acta** 151: 141–152.

Rahman, M. A., and Hasegawa, H. (2011). Aquatic arsenic: Phytoremediation using floating macrophytes. **Chemosphere** 83: 633–646.

Sampanpanish, P. (2015). **Phytoremediation**. Bangkok: Chulalongkorn University. (in Thai)

Sancha, A. M., and Castro, M. L. (2001). **Arsenic in Latin America: occurrence, exposure, health effects and remediation**. Amsterdam: Elsevier.

Su, C., and Puls, R. W. (2001). Arsenate and arsenite removal by zerovalent iron: kinetics, redox transformation, and implycation for *in situ* groundwater remediation. **Environmental Science and Technology** 35(7): 1487–1492.

Sun, G. F., Pi, J. B., Li, B., Guo, X. Y., Yamauchi, H., Yoshida, T. (2001). **Progresses on researches of endemic arsenism in China: Population at risk, intervention actions, and related scientific issues**. Amsterdam: Elsevier.

Wei, C. Y., Sun, X., Wang, C. and Wang, W. Y. (2006). Factors influencing arsenic accumulation by *Pterisvittata*: A comparative field study at two sites. **Environmental Pollution** 141: 488–493.

Williams, M. (1997). **Mining–related Arsenic Hazards: Thailand Case-study**. British: Geological Survey Technical Report.