

ศักยภาพของกกอียิปต์ในการดูดสะสมสารหนูอนินทรีย์
ชนิดอาร์เซไนต์และอาร์เซเนตในดินน้ำขัง
Potential of *Cyperus papyrus* (L.) for Inorganic Arsenic
Accumulation in Cases of Arsenite and Arsenate
in Submerged Soil

จอมจันทร นทีวัฒนา^{1*} ศิริเพ็ญ ตรีชัยยาพร² จินตพัฒน์ นทีวัฒนา³ มะลิวัลย์ แซ่ฮ้อย⁴

ประสงค์ ถาวรยุติการณ⁵ และ สมพร ชุนหล่อชานนท์⁶

Jomjun Nateewattana^{1*} Siripen Trichaiyaporn² Jintapat Nateewattana³ Maliwan Saouy⁴

Prasak Thavornyutikarn⁵ and Somporn Choonluchanon⁶

¹ สหสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (นานาชาติ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

² ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

³ สาขาพืชวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพมหานคร 10400

⁴ สาขาเทคโนโลยีชีวภาพทางพืช คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

⁵ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

⁶ ภาควิชาปฐพีศาสตร์และอนุรักษศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง

จังหวัดเชียงใหม่ 50200

วันที่ส่ง : 26 กันยายน 2560 วันที่แก้ไข : 4 มิถุนายน 2561 วันที่ตอบรับ : 22 มิถุนายน 2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของการเป็นพืชบำบัดของกกอียิปต์ในการดูดสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในดินที่ปนเปื้อนสารหนูอนินทรีย์ในรูป As(III) และ As(V) รูปแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 × 4 ในแบบแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ประกอบด้วย 2 ปัจจัยคือ ชนิดของสารหนูในดินได้แก่ As(III) และ As(V) รวมทั้งชุดควบคุม จำนวนวันที่เพาะปลูก 4 ระยะเวลาได้แก่ 15, 30, 45 และ 60 วัน ผลการศึกษาพบว่า เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน (Two way ANOVA) ปัจจัยที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p-value = 0.000) ของน้ำหนักแห้งที่ลดลงได้แก่ ชนิดของสารหนูในดิน โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่ม โดยวิธีของด้นเนตต์พบว่า พืชที่ปลูกในดินที่ใส่ As(III) มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักแห้งมากกว่า As(V) ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในกกอียิปต์ทั้งต้นอย่างมีนัยสำคัญ (p-value = 0.000) ได้แก่ ชนิดของสารหนูในดิน และจำนวนวันที่เพาะปลูก โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพบว่า กกอียิปต์มีการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในดินที่ใส่ As(V) มากกว่า As(III) เมื่อเรียงลำดับค่าเฉลี่ยการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดตามจำนวนวันที่เพาะปลูกพบว่า 30 > 15 > 45 > 60 และทั้ง 2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกันอย่างมีนัยสำคัญ (p-value = 0.000) สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการ

* ที่อยู่ติดต่อ โทรศัพท์ 084-177-3194 Email address: jomjun_102@hotmail.com

สะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดของอวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอีียิปต์อย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} = 0.000$) รูปแบบการทดลองแฟคทอเรียล $3 \times 4 \times 4$ ในแบบแผน การทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Three way ANOVA) ได้แก่ ชนิดของสารหนูในดิน จำนวนวันที่เพาะปลูก และอวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอีียิปต์ โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพบว่า $\text{As(V)} > \text{As(III)} > \text{ชุดควบคุม}$, $30 > 15 > 45 > 60$ และราก $> \text{ใบ} > \text{ลำต้นใต้ดิน} > \text{ลำต้น}$ อีกทั้งปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ 2 ปัจจัย ($p\text{-value} = 0.000$) ได้แก่ ชนิดของสารหนูในดิน * จำนวนวันที่เพาะปลูก, ชนิดของสารหนูในดิน * อวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอีียิปต์ และจำนวนวันที่เพาะปลูก * อวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอีียิปต์ รวมทั้งปัจจัยทั้งสามมีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} = 0.000$) ความเข้มข้นทางชีวภาพของกกอีียิปต์ในดินที่ใส่ As(V) และ As(III) มีค่าสูงสุดในวันที่ 30 มีค่าเท่ากับ 0.9851 และ 0.7885 และค่าการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือดินพบว่า ดินที่ใส่ As(III) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดการทดลองตั้งแต่ 0.78 – 2.54 ขณะที่ดินที่ใส่ As(V) มีค่าสูงในช่วงแรกแล้วค่อยๆ ลดลงโดยค่าอยู่ระหว่าง 1.57 – 2.54

คำสำคัญ : อาร์เซนิต สารหนู อาร์เซไนต์ กกกอีียิปต์ ดินน้ำขัง

Abstract

The purpose of this research was to study the properties of *Cyperus papyrus* (L.) to total arsenic accumulation in arsenic contaminated submerged soil as arsenite As(III) and arsenate As(V) forms. The experimental design was 3×4 factorial in the CRD plan consisted of two factors including arsenic speciation in submerged soil: As(III) , As(V) and control group, and growing periods: 15, 30, 45 and 60 days. As a result, two way ANOVA analysis was used to determine the significant factor of % dry weight decrease ($p\text{-value} = 0.000$) was arsenic speciation. The multiple comparison of mean in each group by Dunnett's T3 method showed that *C. papyrus* in As(III) treated soils had a lower percentage of dry weight than As(V) treated soil. The factors significantly affecting total arsenic accumulation in *C. papyrus* ($p\text{-value} = 0.000$) were arsenic speciation and growing period. The multiple comparison found that *C. papyrus* accumulated total arsenic from As(V) treated soil greater than As(III) treated soil and growing periods were calculated as $30 > 15 > 45 > 60$ as well as both 2 factors significantly influenced each other ($p\text{-value} = 0.000$). The significant factors affected the total arsenic accumulation of various organs of *C. papyrus* ($p\text{-value} = 0.000$) by $3 \times 4 \times 4$ factorial experiment in the CRD plan (Three way ANOVA) including arsenic speciation, growing period, and various organs of *C. papyrus*. The multiple means comparison of factors found that $\text{As(V)} > \text{As(III)} > \text{Control group}$, $30 > 15 > 45 > 60$ days, and root $> \text{leaf} > \text{rhizome} > \text{culm}$. Two factors had significant influence each other ($p\text{-value} = 0.000$) consisted of arsenic speciation * growing period, arsenic

speciation * various organs *C. papyrus*, and growing period * various organs of *C. papyrus*, whereas these three factors had co-influence significantly (p-value = 0.000). Bioconcentrations of *C. papyrus* in As (V) and As (III) contaminated soil were the highest at 30 days at 0.9851 and 0.7885. Arsenic accumulation translocation factor found that *C. papyrus* in As(III) treated soil increased continuously throughout the experiment from 0.78 to 2.54, whereas As (V) treated soil was high value in the first stage and then gradually decreased between 1.57 - 2.54.

Keywords: Arsenate, Arsenic, Arsenite, *Cyperus papyrus* (L.), Submerged soil

1. บทนำ

สารหนูเป็นสารมลพิษที่มีความสำคัญในสิ่งแวดล้อม พบตามธรรมชาติในชั้นหินของเปลือกโลกมักอยู่ในรูปสารประกอบในก้อนแร่ที่อยู่ในหิน ดิน และแหล่งน้ำบาดาล และเกิดจากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่ การทำเหมืองแร่ การใช้ถ่านหิน และเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ประเทศไทยมีการปนเปื้อนสารหนูลงในแหล่งน้ำอุปโภคบริโภค จากการทำเหมืองดีบุกในพื้นที่อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช การสัมผัสสารหนูส่งผลกระทบต่อระบบหัวใจหลอดเลือด ระบบประสาทและทางเดินอาหาร ตับไต และก่อให้เกิดมะเร็งผิวหนัง โดยพิษของสารหนูมีทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง ขึ้นกับชนิด ปริมาณ และระยะเวลาที่ได้รับสารพิษ [1] การบำบัดและกำจัดสารหนูแบ่งเป็นวิธีการทางกายภาพ เคมี ชีวภาพ และการบำบัดแบบผสมผสาน ซึ่งการเลือกใช้วิธีการบำบัดจะขึ้นกับปริมาณและชนิดของสารหนูในพื้นที่ปนเปื้อน วิธีการทางกายภาพและเคมีจะใช้กับพื้นที่ปนเปื้อนสารหนูที่มีความเข้มข้นสูง แตกต่างจากวิธีทางชีวภาพ แต่ส่วนใหญ่จะมีการใช้หลายวิธีผสมผสานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด [2] สารหนูตามธรรมชาติจะปรากฏใน 4 วาเลนซ์คือ อาร์เซนิต [As(V)] อาร์เซไนต์ [As(III)] อาร์เซนิก (As^0) และอาร์ซีน [As(-III)] ความเป็นพิษของสารหนูขึ้นกับวาเลนซ์และความเข้มข้น ชนิดของสารหนูมีทั้งที่เป็นสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยสารหนูที่เป็นสารประกอบอนินทรีย์จะมีพิษมากกว่าสารประกอบอินทรีย์ สารหนูอนินทรีย์ชนิด As(III) มีพิษมากกว่า As(V) โดย As(V) พบมากในสภาวะมีออกซิเจน ขณะที่ As(III) พบมากในสภาวะขาดออกซิเจน [3, 4] พืชบางชนิดพบสารหนู อนินทรีย์เป็นหลักได้แก่ As(III) และ As(V) แต่สารหนูในรูปอินทรีย์จะพบในพืชที่ขึ้นในที่ทะเล พืชบางชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในดินที่มีความเข้มข้นของสารหนูสูง โดยมีการพัฒนากลไกในการต้านทานสารหนูเช่น พืชจำพวกเฟิร์น *Pteris vittata* L.[5]

การบำบัดสารมลพิษจากสิ่งแวดล้อมโดยใช้ธรรมชาติ (Bioremediation) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม การบำบัดขึ้นกับศักยภาพของพืช ชนิดและความเข้มข้นของสารมลพิษที่จะบำบัด [6] วิธีพืชบำบัด (Phytoaccumulation) ใช้พืชดูดสะสมสารมลพิษจากตัวกลางสิ่งแวดล้อมไปสะสมไว้ที่ราก แล้วจึงส่งต่อไปยังส่วนต่างๆ พืชกลุ่มไฮเปอร์แอคคิวมิวเลเตอร์ (Hyperaccumulator) สามารถสะสมสารพิษได้มากถึง 100 -1,000 เท่า โดยสามารถเคลื่อนย้ายสารมลพิษจากดินไปสู่รากได้ในอัตราที่สูง มีการสะสมสารพิษปริมาณมากในราก และส่งไปยังส่วนที่อยู่เหนือดินได้ดี มีความทนทาน นิยมนำมาบำบัดโลหะหนักชนิดต่างๆ รวมทั้งสารหนู [2, 7] กลไกการทำงานคือ ลำเลียงสารมลพิษผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ทางราก

พืชผ่านตัวลำเลียงประจุบวก โดยแพร่ผ่านเข้าสู่ช่องที่เป็นประจุบวก เพื่อเคลื่อนย้ายมวลสารสู่ยอดพืช ผ่านท่อลำเลียงน้ำในกระบวนการคายน้ำ ทำการบำบัดได้ทั้งแบบปลูกในสภาพธรรมชาติ และปลูกโดยเติมสารปรับปรุงดินหรือสารชักนำ (Induced phytoextraction) เพื่อเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนย้ายสารมลพิษ [4]

การทดลองครั้งนี้ใช้วิธีปลูกเลียนแบบสภาพธรรมชาติในสภาวะดินน้ำขัง ซึ่งบำบัดได้ยาก และสารหนูส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป As(III) ที่เป็นพิษสูง เนื่องจากเป็นสภาวะขาดออกซิเจน โดยใช้กกอียิปต์ *Cyperus papyrus* (L.) เป็นพืชวงศ์ Cyperaceae เจริญเติบโตในดินน้ำขัง มีวงชีวิตยาวนาน มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นพิษ [8] วัตถุประสงค์การวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติของการเป็นพืชบำบัดของกกอียิปต์ ในการดูดสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในดินที่ปนเปื้อนสารหนูอนินทรีย์ในรูป As(III) และ As(V) ระยะเวลาการเพาะปลูกแบ่งเป็น 4 ระยะได้แก่ 15, 30, 45 และ 60 วัน รวมทั้งวิเคราะห์การสะสมในอวัยวะส่วนต่างของกกอียิปต์ คุณสมบัติการเคลื่อนย้ายสารหนูสู่ส่วนเหนือดิน และการเป็นพืชไฮเปอร์แอคคิวมิเลเตอร์ งานวิจัยนี้มีความสำคัญส่งผลต่อการบำบัดสารหนูอนินทรีย์ชนิด As(III) และ As(V) ในสภาพดินน้ำขัง ซึ่งจะได้นำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่บ่อบำบัด รวมทั้งพื้นที่ชุ่มน้ำตามธรรมชาติที่อยู่ในบริเวณพื้นที่เสี่ยงภัย เพื่อเป็นแนวกันชนต่อการปล่อยสารหนูออกสู่สิ่งแวดล้อม

2. วิธีการศึกษา

2.1 แผนการทดลอง

1. วิธีการศึกษาสำหรับผลการทดลองส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3×4 ประกอบด้วย 2 ปัจจัยดังนี้ ชนิดของสารหนูที่ใส่ในดินเพื่อทดสอบได้แก่ อาร์เซนไนต์ [As(III)] และอาร์เซนเต [As(V)] โดยใช้ความเข้มข้น 175 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และจำนวนวันที่เก็บเกี่ยวได้แก่ 15, 30, 45 และ 60 วัน 2. วิธีการศึกษาสำหรับผลการทดลองส่วนที่ 3 ใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล $3 \times 4 \times 4$ ประกอบด้วย 3 ปัจจัยดังนี้ ชนิดของสารหนูที่ใส่ในดินเพื่อทดสอบได้แก่ อาร์เซนไนต์ [As(III)] และอาร์เซนเต [As(V)] โดยใช้ความเข้มข้น 175 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จำนวนวันที่เก็บเกี่ยวได้แก่ 15, 30, 45 และ 60 วัน และอวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอียิปต์ได้แก่ ราก ลำต้นใต้ดิน ลำต้น และใบ โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ การเตรียมดินและพืชในการทดลองใช้ดินน้ำขังจากเขตอำเภอดงหลวง จังหวัดเชียงใหม่ นำมาตากลมให้แห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm แล้วจึงบ่มดินกับสารหนูทั้งสองชนิด กกอียิปต์เก็บจากธรรมชาติในพื้นที่ปราศจากการปนเปื้อนในเขตอำเภอดงหลวง จังหวัดเชียงใหม่ นำมาอนุบาลเป็นระยะเวลา 2 เดือน แล้วจึงวิเคราะห์ปริมาณสารหนูทั้งหมดในดินและพืชตัวอย่างก่อนนำไปทดลอง นำพืชไปปลูกในกระถางขนาด 12×12 นิ้ว ใส่ดินที่บ่มสารหนู 5 กิโลกรัมต่อกระถาง รักษาระดับน้ำในกระถางให้คงที่ 2 เซนติเมตรเหนือผิวดิน

2.2 การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างดินจากทุกกระถางตามตารางเวลาที่ระดับต่ำกว่าผิวดิน 15 เซนติเมตร นำไปอบแห้งที่ 70°C จนน้ำหนักคงที่ บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm และเก็บในถุงพลาสติกที่แห้งสนิท ตัวอย่างพืชเมื่อครบเวลาทำการนำมาล้างด้วยน้ำสะอาด เช็ดให้แห้ง แล้วจึงชั่งน้ำหนักทั้งต้นจากนั้นทำการแยก

แต่ละส่วนของพืชได้แก่ ใบ (Leaf) ลำต้น (Culm) ลำต้นใต้ดิน (Rhizome) และราก (Root) ทำการชั่งน้ำหนักแต่ละส่วนอีกครั้ง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 85 °C จนน้ำหนักคงที่ เก็บตัวอย่างในถุงพลาสติกที่แห้งและปิดสนิท

การวิเคราะห์ตัวอย่าง วัดค่าความเป็นกรดต่าง (pH) และศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน Eh (Oxidation reduction potential) ในพื้นที่ทดลองและบันทึกผล ทำการชั่งดินที่บดและร่อนแล้ว 0.500 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้น (HNO₃) 7 มิลลิลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% H₂O₂) 2 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 6 ชั่วโมง นำไปย่อยที่ 85 °C 48 ชั่วโมง แล้วจึงปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 25 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน (De-ionized water) เก็บในขวดไฮเดซีพีอี (HDPE; High density polyethylene) การย่อยพืช โดยชั่งพืชที่บดแล้ว 0.5000 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้น (HNO₃) 7 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30% H₂O₂) 2 มิลลิลิตร ทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำไปย่อยที่ 85 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตร 25 มิลลิลิตร เก็บในขวดพลาสติกชนิดไฮเดซีพีอี [9]

การตรวจวัดสารหนูแบบปริมาณสารหนูทั้งหมด [9] ทำการเตรียมสารมาตรฐานหรือตัวอย่างจำนวน 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติม 6 มิลลิลิตร ของ HCl : H₂O₂ (1:1) และเติม 1 มิลลิลิตร ของ 10% KI analytical reagent grade ผสมให้เข้ากันและทิ้งให้เกิดปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง นำมาตรวจวัดด้วยวิธี Hydride - Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) การตรวจสอบความเที่ยงตรงและแม่นยำโดยใช้ Reagent blanks และ Internal Standards โดย Detection limit ของวิธีนี้คือ 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือมิลลิกรัมต่อลิตร

2.3 การคำนวณและวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติ

การเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือดิน (Arsenic accumulation translocation factor, ATF) เป็นสัดส่วนระหว่างปริมาณสารหนูในส่วนเหนือดินต่อปริมาณสารหนูในส่วนใต้ดิน การคำนวณความเข้มข้นทางชีวภาพ (Bioconcentration factor, BCF) เป็นสัดส่วนระหว่างปริมาณสารหนูในพืชต่อปริมาณสารหนูในดิน สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลได้แก่ การวิเคราะห์ความแปรปรวนพหุคูณ (ANOVA) และการเปรียบเทียบพหุคูณของแต่ละปัจจัยโดยวิธีของดันเนตต์ (Dunnett's T3)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

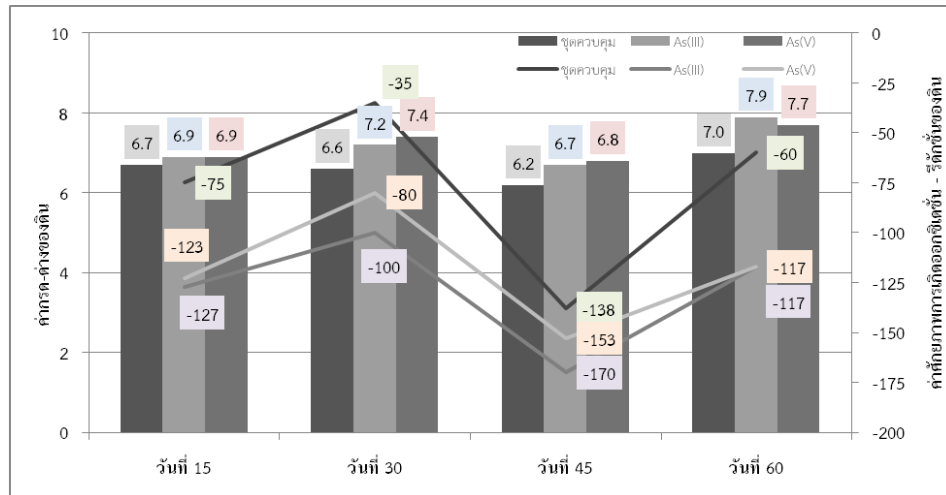
3.1 การลดลงของน้ำหนักแห้งของกกอีียิปต์

รูปที่ 1 แสดงค่า pH และ Eh ในดินตัวอย่างพบว่า ความเป็นกรดต่าง (pH) ของดินชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 6.2 – 7.0 pH ของดินที่ใส่ As(III) และ As(V) มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 6.7 – 7.9 และ 6.8 – 7.7 สำหรับศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชัน (Eh) ในดินชุดควบคุม ดินที่ใส่ As(III) และ As(V) มีค่าระหว่าง -138 ถึง -35, -170 ถึง -100 และ -153 ถึง -80 ตามลำดับ รูปที่ 2 กราฟแท่งแสดงค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของกกอีียิปต์ เมื่อปลูกในดินที่ใส่ As(III) และ As(V) ซึ่งพบว่า กกอีียิปต์ที่ปลูกใน As(III) มีน้ำหนักแห้งน้อยกว่า As(V) และชุดควบคุมในทุกเวลาเพาะปลูก และกราฟเส้นแสดงเปอร์เซ็นต์

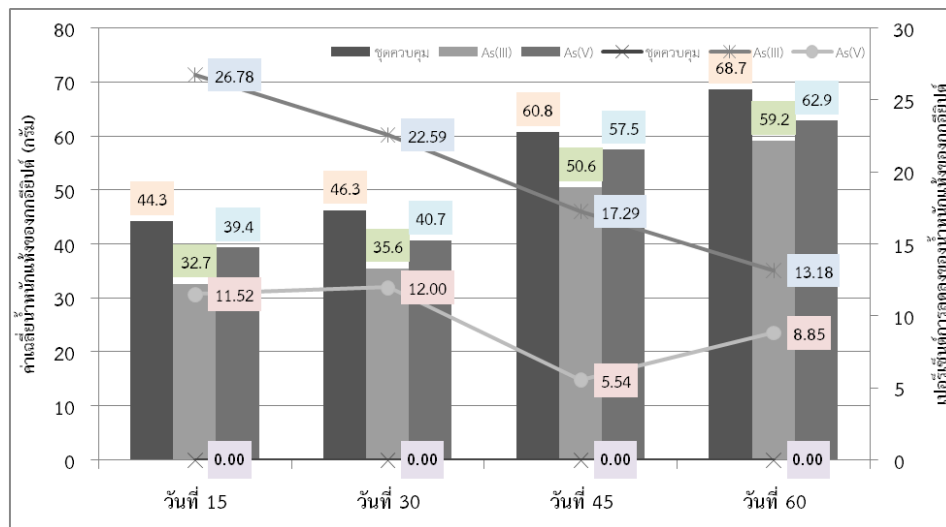
น้ำหนักแห้งที่ลดลงของกกอียิปต์จะเห็นว่า ต้นที่ปลูกในดินที่ใส่ As(III) มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักแห้งมากกว่า As(V) ตลอดการทดลอง โดยกกอียิปต์ที่ปลูกใน As(III) เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องแต่ As(V) มีแนวโน้มคงที่แล้วจึงค่อยๆ ลดลง เมื่อทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) จากตารางที่ 1 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักแห้งอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} = 0.000$) คือ ชนิดของสารหนูในดิน โดยผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแต่ละกลุ่ม (Multiple comparison) โดยวิธีของดันเนตต์ (Dunnett's T3) พบว่า เปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักแห้งของกกอียิปต์ที่ปลูกในดินที่ใส่ As(III) มีค่าเฉลี่ย 28% และ As(V) มีค่าเฉลี่ย 13.32% ตามรูปที่ 3 อาการของพืชเมื่อรับสารหนูในดินจากการศึกษาของ Gomez-Caminero *et al.* [10] พบว่า พืชจะแคระแกรน มีอาการออกที่ใบ บ่งชี้ถึงการความเครียดอันเนื่องมาจากการขาดน้ำ (Water – deficiency stress) และรากได้รับความเสียหาย อีกทั้ง As(III) และ As(V) ยับยั้งการเจริญเติบโตของราก ทำให้พืชตายในที่สุด [11]

ตารางที่ 1. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลง

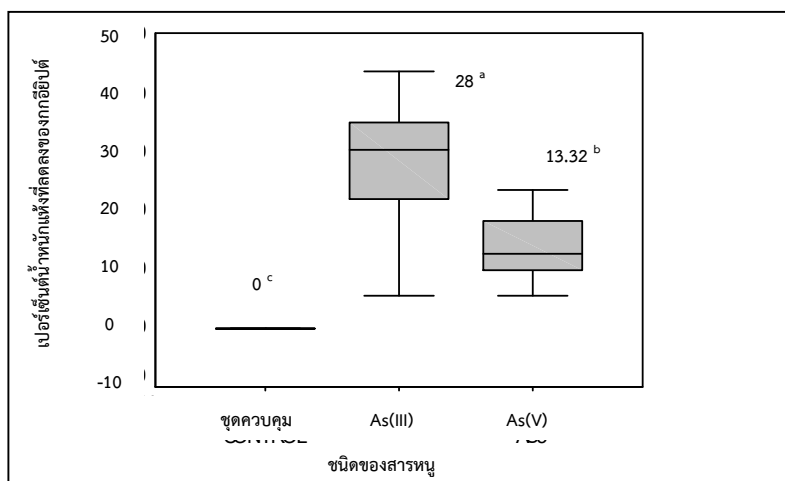
แหล่งความแปรปรวน	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	4746.57	11	431.51	6.64	0.000
Intercept	6828.27	1	6828.27	105.00	0.000
จำนวนวันที่เพาะปลูก	19.74	3	6.58	0.10	0.959
ชนิดของสารหนู	4707.74	2	2353.87	36.20	0.000
วันที่เพาะปลูก * ชนิดของสารหนู	19.09	6	3.18	0.05	0.999
Error	1560.79	24	65.03		
Total	13135.62	36			
Corrected Total	6307.35	35			
หมายเหตุ: R Squared = .753 (Adjusted R Squared = .639)					



รูปที่ 1. ความเป็นกรดต่างและค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชันในดิน



รูปที่ 2. ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งและเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักแห้งของกอกอียิปต์

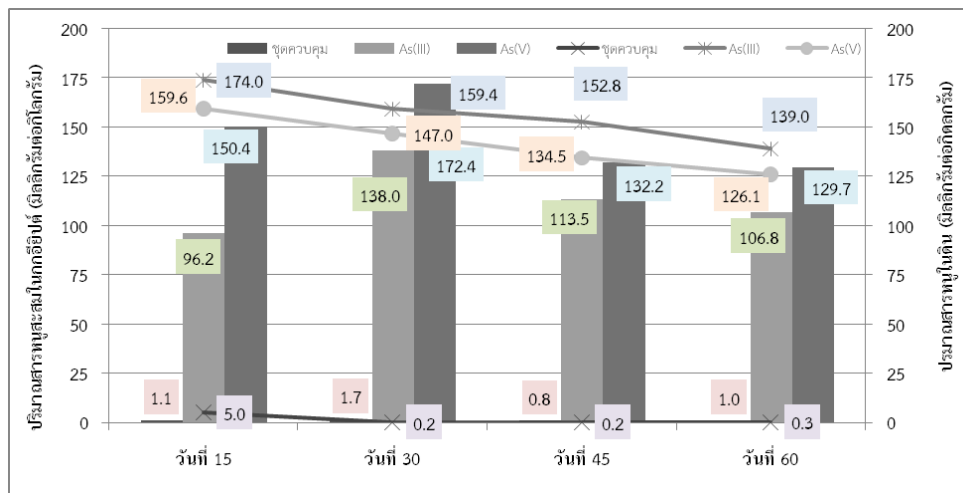


รูปที่ 3. การเปรียบเทียบพหุคูณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งที่ลดลงของกกอียิปต์
:ชนิดสารหนูที่แตกต่างกัน

3.2 การสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดของต้นกกอียิปต์

จากรูปที่ 4 กราฟแท่งแสดงปริมาณปริมาณสารหนูทั้งหมดในกกอียิปต์พบว่า กกอียิปต์ที่ปลูกในดินที่ใส่ As(V) มีการดูดสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดมากกว่า As(III) ตลอดระยะเวลาการเพาะปลูก 60 วัน และกราฟเส้นแสดงค่าปริมาณสารหนูทั้งหมดในดินทดสอบ จากตารางที่ 2 เมื่อทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในกกอียิปต์อย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} = 0.000$) ได้แก่ ชนิดของสารหนูในดิน และระยะเวลาการเพาะปลูก โดยทำการทดสอบค่าเฉลี่ยแต่ละกลุ่ม (Multiple comparison) โดยวิธีของดันเนตต์ (Dunnett's T3) พบว่า กกอียิปต์ที่ปลูกในดินที่ใส่ As(V) มีการดูดสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดมากกว่า As(III) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 146.08 และ 113.58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยปัจจัยระยะเวลาที่เพาะปลูกเรียงลำดับได้ดังนี้ วันที่ 30 > 15 > 45 > 60 โดยมีค่าเฉลี่ย 104, 82.56, 82.22 และ 79.11 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ จากการทดลองพบว่า กกอียิปต์มีการเจริญเติบโตเป็นปกติในช่วง 30 วัน แล้วจึงเริ่มลดการเจริญเติบโต แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 นอกจากนี้ปัจจัยทั้งสองมีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญต่อการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดของกกอียิปต์ ($p\text{-value} = 0.000$) การสะสมสารหนูตามชนิดที่แตกต่างกันมีการสะสมไม่เท่ากันในพืช จากการศึกษาของ Kabata and Pendias [12] และ O'Neill [13] พบว่า รากถั่วมีลำดับการดูดสะสมสารหนูโดยขึ้นกับชนิดของสารหนูดังนี้ $\text{As(III)} > \text{As(V)} > \text{Monomethylarsonic acid} > \text{Dimethylarsinic acid}$ และการศึกษาของ Marin *et al.* [14] พบว่า ข้าวมีการสะสมสารหนูชนิดต่างๆ ดังนี้ $\text{As(III)} > \text{Monomethylarsonic acid} > \text{As(V)} > \text{Dimethylarsinic acid}$ จากงานวิจัยของ Fayiga *et al.* [15] พบว่า เวลาในการเพาะปลูกเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดูดสะสมและเคลื่อนย้ายสารหนูอย่างมีนัยสำคัญโดยมีการทดสอบใน *Pteris vittata* (L.), *Pteris cretica mayii*, and *Nephrolepis exaltata* (L.) นอกจากนี้ปริมาณการดูดสะสมขึ้นกับชนิดของพืช ชนิดของสารหนู ระยะเวลาที่เพาะปลูก และความเข้มข้นของสารหนู ซึ่งการเพิ่มมวลชีวภาพของพืชและการดูดสะสมในแต่ละช่วงเวลาจะส่งผลต่อปริมาณสารหนูทั้งหมดที่พืชดูดสะสมไว้

ความเป็นพิษของสารหนูต่อพืชเป็นปัจจัยหลักในการดูดสะสม โดย สารหนูจะแทรกแซงกระบวนการเมแทบอลิซึมของฟอสเฟตและระบบเอนไซม์ที่ทำลายสารพิษ เพื่อลดผลกระทบสารพิษที่มีต่อพืช เมื่อพืชรับเอา As(III) และ As(V) ที่มีความเข้มข้นสูงจะมีการพัฒนากลไกต้านทานสารหนูเช่น ลดการดูดสะสมและการเปลี่ยนรูปสารพิษ [5]

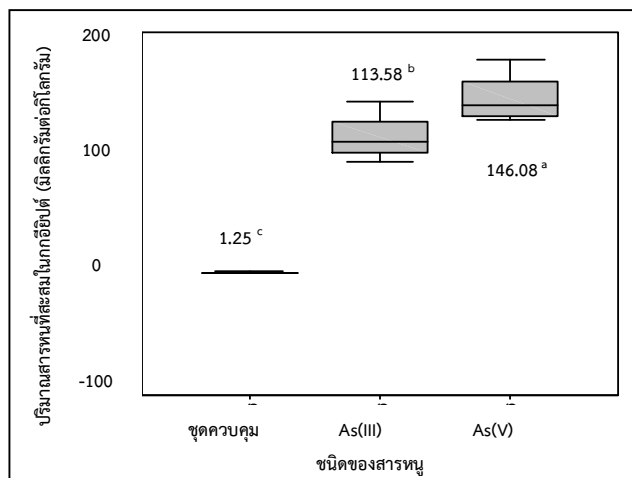


รูปที่ 4. ปริมาณสารหนูสะสมในกกอีียปต์และปริมาณสารหนูในดิน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

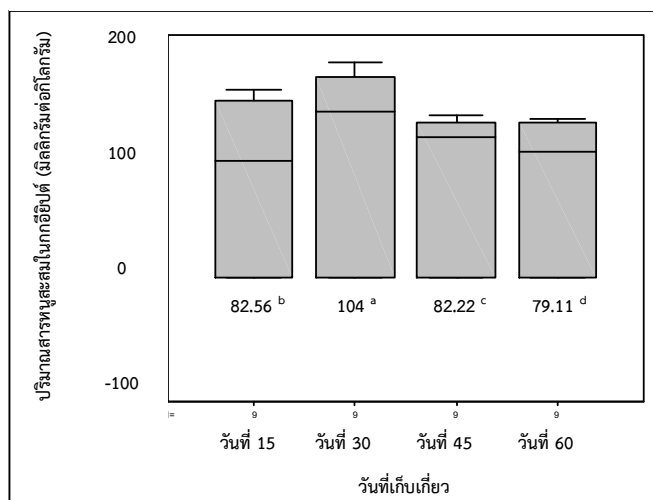
ตารางที่ 2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ปริมาณการสะสมสารหนูของกกอีียปต์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

แหล่งความแปรปรวน	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	144910.31	11	13173.66	817.68	0.000
Intercept	272310.03	1	272310.03	0	0.000
จำนวนวันที่เพาะปลูก	3544.31	3	1181.44	73.33	0.000
ชนิดของสารหนู	138606.89	2	69303.44	4301.59	0.000
วันที่เพาะปลูก * ชนิดของสารหนู	2759.11	6	459.85	28.54	0.000
Error	386.67	24	16.11		
Total	417607	36			
Corrected Total	145296.97	35			

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



รูปที่ 5. การเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณสารหนูสะสมในกอกอียิปต์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) : ชนิดสารหนูที่แตกต่างกัน

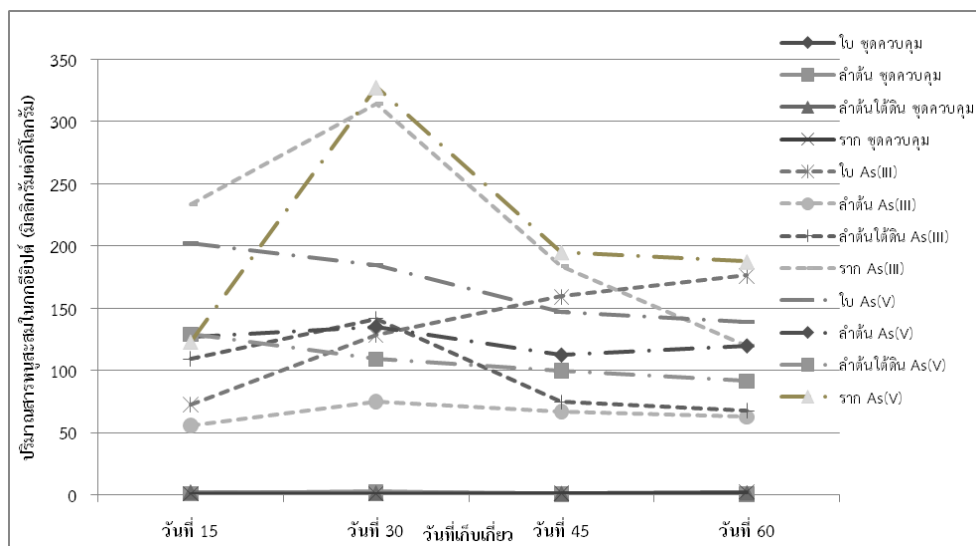


รูปที่ 6. การเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณสารหนูสะสมในกอกอียิปต์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) : วันที่เพาะปลูก

3.3 การสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในอวัยวะส่วนต่างๆ ของกอกอียิปต์

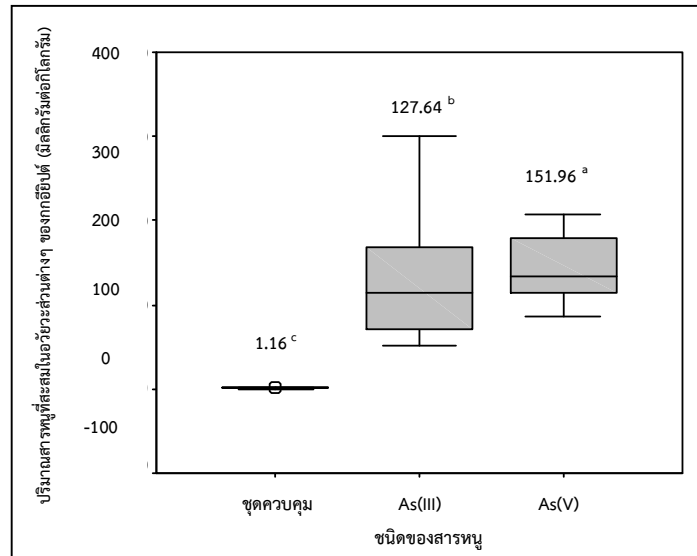
จากรูปที่ 7 แสดงการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในอวัยวะส่วนต่างๆ ของกอกอียิปต์พบว่า ในวันที่ 15 ของการเพาะปลูกมีการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในรากของกอกอียิปต์ที่ปลูกในดินที่ใส่ As(III) มากที่สุด สำหรับวันที่ 30, 45 และ 60 ส่วนรากที่ปลูกในดินที่ใส่ As(V) มีการสะสมสูงที่สุด โดยเมื่อทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) ตามตารางที่ 3 พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในอวัยวะส่วนต่างๆ ของกอกอียิปต์อย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} = 0.000$) ได้แก่ ชนิดของสารหนูในดิน จำนวนวันที่เพาะปลูก และอวัยวะส่วนต่างๆ ของกอกอียิปต์ โดยปัจจัย 2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมต่อการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในส่วนต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} = 0.000$) ได้แก่ ชนิด

ของสารหนูในดิน * จำนวนวันที่เพาะปลูก, ชนิดของสารหนูในดิน * อวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอียิปต์ และจำนวนวันที่เพาะปลูก * อวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอียิปต์ และทั้งสามปัจจัยมีอิทธิพลร่วมต่อการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดของอวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอียิปต์อย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} = 0.000$) ได้แก่ ชนิดของสารหนูในดิน * จำนวนวันที่เพาะปลูก * อวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอียิปต์

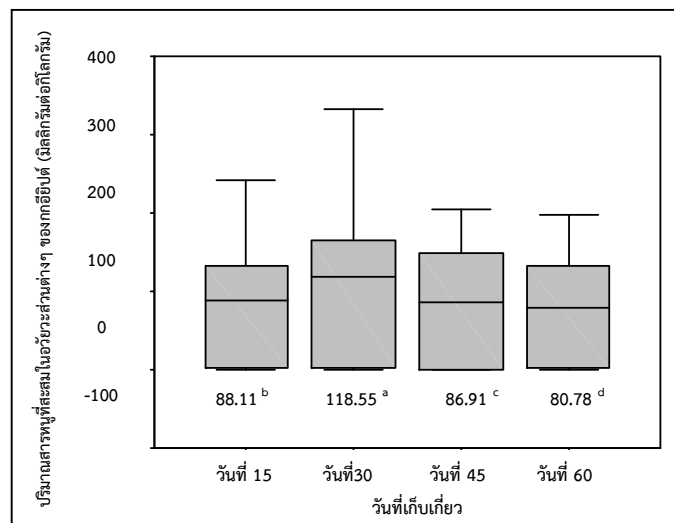


รูปที่ 7. ปริมาณสารหนูสะสมในใบ ลำต้น ลำต้นใต้ดิน และรากของกกอียิปต์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 15, 30, 45 และ 60

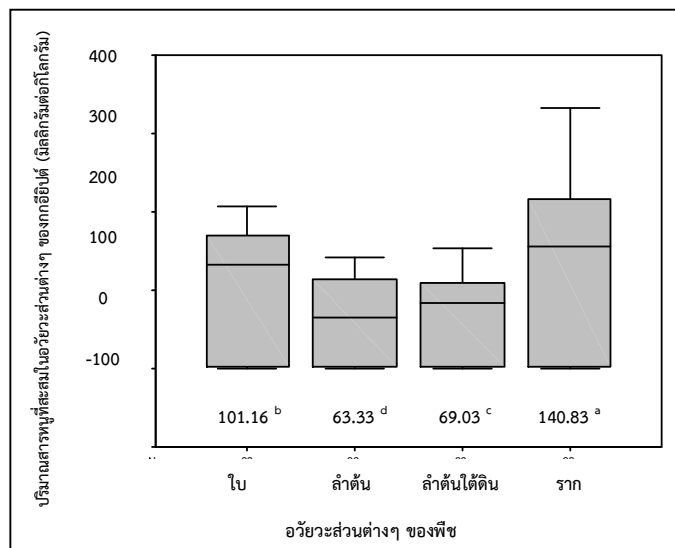
จากรูปที่ 8-10 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย (Multiple comparison) ของแต่ละกลุ่มของปัจจัยที่มีอิทธิพลพบว่า อวัยวะแต่ละส่วนของกกอียิปต์มีการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในดินที่ใส่ As(V) มากกว่า As(III) และชุดควบคุม โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 151.96, 127.64 และ 1.16 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ สำหรับจำนวนวันที่เพาะปลูกพบว่า มีค่าเฉลี่ยการดูดสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดดังนี้ $30 > 15 > 45 > 60$ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 118.55, 88.11, 86.91 และ 80.78 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ อวัยวะที่มีการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดจากมากไปน้อยเรียงตามลำดับได้แก่ ราก > ใบ > ลำต้นใต้ดิน > ลำต้น โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 140.83, 101.16, 69.03 และ 63.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ส่วนใหญ่สารหนูจะสะสมในส่วนใต้ดิน มีส่วนน้อยมากที่จะส่งขึ้นไปสู่ส่วนเหนือดินเช่น ข้าวร้อยละ 90 สะสมในราก เนื่องจากจะก่อพันธุกับเหล็กออกไซด์ (Iron oxide) รอบๆ ราก ทำให้ลดการเคลื่อนย้ายสู่ส่วนบน อีกทั้งกลไกแข่งขันกับฟอสเฟส (Phosphate) ที่จำกัดการเคลื่อนย้ายจากรากไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืช [5, 16-18] จากการศึกษาของ Lukasz *et al.* [5] ที่ศึกษาปริมาณสารหนูในอ้อเล็ก ชื่อสามัญคือ Reed grass ชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. และเลดี้เฟิร์น ชื่อสามัญคือ Lady fern ชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Athyrium filix-femina* (L.) Roth ที่เติบโตในเมืองทอง Zloty stok ในประเทศโปแลนด์ที่มีสารหนูปนเปื้อนในปริมาณสูงมากถึง 1.98 ± 0.12 กรัมต่อกิโลกรัม พบว่า พืชทั้งสองมีความทนทานไม่มีลักษณะความผิดปกติ โดยพืชทั้งสองชนิดสะสมมากที่สุดที่ราก ลำดับการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดของเลดี้เฟิร์นคือ ราก > ลำต้นใต้ดิน > ใบ > ลำต้น แต่ของอ้อเล็กคือ ราก > ใบ



รูปที่ 8. การเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณสารหนูที่สะสมในอวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอีลิปต์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) : ชนิดของสารหนู



รูปที่ 9. การเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณสารหนูที่สะสมในอวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอีลิปต์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) : ระยะเวลาที่เพาะปลูก



รูปที่ 10. การเปรียบเทียบพหุคูณของปริมาณสารหนูที่สะสมในอวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอียิปต์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) : อวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอียิปต์

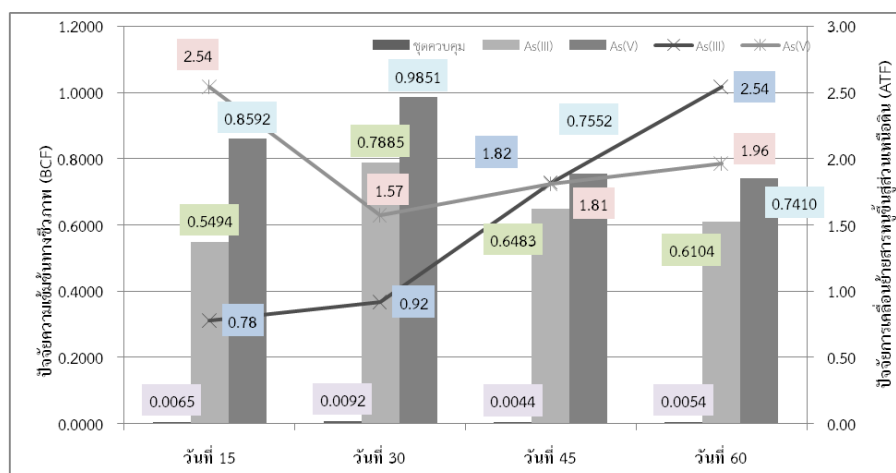
3.4 ปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพ (Bioconcentration factor, BCF) และปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือดิน (Arsenic accumulation translocation factor, ATF)

จากรูปที่ 11 กราฟแท่งแสดงปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพและกราฟเส้นแสดงปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือดิน ความเข้มข้นทางชีวภาพคือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารหนูที่สะสมในพืชต่อสารหนูในดิน โดยพืช Hyperaccumulating plant จะมีค่ามากกว่า 1 [19] พบว่า กกอียิปต์ที่ปลูกในดินที่ใส่ As(III) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5494 – 0.7885 และในดินที่ใส่ As(V) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.7410 – 0.9851 สำหรับปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือดินคือ สัดส่วนระหว่างปริมาณสารหนูที่สะสมในส่วนเหนือดินกับส่วนใต้ดิน พืชที่ใช้ในการบำบัดมลสารควรมีศักยภาพในการส่งผ่านสารมลพิษที่บำบัดขึ้นสู่ส่วนเหนือดิน เพื่อไม่เกิดการตกค้างในดินเมื่อผ่านการบำบัด หากมีการเก็บเกี่ยวส่วนใต้ดินที่ไม่เหมาะสม [7, 20] จากการทดลองพบว่า กกอียิปต์ในดินที่ใส่ As(III) มีค่าปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือดินเท่ากับ 0.78 – 2.54 ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการเพาะปลูก และในดินที่ใส่ As(V) มีค่าปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือดินเท่ากับ 1.57 – 2.54 มีสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดสูงในช่วงแรกแล้วจึงลดลง พืช Hyperaccumulator สามารถสะสมสารพิษได้ในปริมาณมาก สำหรับสารหนูเช่น *Pteris vittata* L. และกลุ่มตระกูลเฟิร์นในสกุล *Pteris* genus [21] เมื่อเปรียบเทียบกับเลดี้เฟิร์นและอ้อเล็ก [5] พบว่า มีปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือดินเท่ากับ 0.17 และ 4.42 และมีปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพของเลดี้เฟิร์นและอ้อเล็กเท่ากับ 0.01 และ 0.27 ในเหมืองทองที่มีสารหนูเข้มข้น 1.98 ± 0.12 กรัมต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 3. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) การสะสมสารหนูในอวัยวะส่วนต่างๆ ของกอกอียิปต์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)

แหล่งความแปรปรวน	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	1017892.86	47	21657.29	367.34	0.000
Intercept	1261261.89	1	1261261.89	21392.84	0.000
ชนิดของสารหนู	629246.79	2	314623.40	5336.47	0.000
จำนวนวันที่เพาะปลูก	31026.96	3	10342.32	175.42	0.000
อวัยวะส่วนต่างๆ ของกอกอียิปต์	137076.62	3	45692.21	775.01	0.000
ชนิดของสารหนู * จำนวนวันที่เพาะปลูก	15547.05	6	2591.17	43.95	0.000
ชนิดของสารหนู * อวัยวะส่วนต่างๆ ของกอกอียิปต์	82899.80	6	13816.63	234.35	0.000
จำนวนวันที่เพาะปลูก * อวัยวะส่วนต่างๆ ของกอกอียิปต์	44577.03	9	4953.00	84.01	0.000
ชนิดของสารหนู * จำนวนวันที่เพาะปลูก * อวัยวะส่วนต่างๆ ของกอกอียิปต์	77518.61	18	4306.59	73.05	0.000
Error	5659.89	96	58.96		
Total	2284814.65	144			
Corrected Total	1023552.76	143			

หมายเหตุ: R Squared = .994 (Adjusted R Squared = .992)



รูปที่ 11. ปัจจัยความเข้มข้นทางชีวภาพ (BCF) และปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูสู่ส่วนเหนือนดิน (ATF)

4. สรุปผลการทดลอง

ผลกระทบจากสารหนูที่มีต่อพืช ประเมินได้จากเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักแห้งของพืช โดยพืชที่ปลูกในดินที่ใส่ As(III) พบว่า น้ำหนักแห้งลดลงมากกว่าดินที่ใส่ As(V) ศักยภาพของต้นกกอีลิปต์ในการดูดสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดมีค่าเฉลี่ย 146.08 และ 113.58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในดินที่ใส่ As(III) และ As(V) ตามลำดับ โดยจะค่อยๆ สะสมเพิ่มขึ้นจนมีปริมาณมากที่สุดในวันที่ 30 แล้วการสะสมจะค่อยๆ ลดลง ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลของการสะสมคือ ชนิดของสารหนูในดิน และระยะเวลาการเพาะปลูก เมื่อจำแนกตามอวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอีลิปต์ที่ทำการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดพบว่า รากมีการสะสมมากที่สุดคือ มีค่าเฉลี่ย 140.83 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รองลงมาคือ ใบ ลำต้นได้ดิน และลำต้น แสดงว่า กกอีลิปต์มีการสะสมมากที่สุดที่ราก แล้วจึงลำเลียงส่งผ่านไปยังใบและส่วนอื่นๆ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการสะสมปริมาณสารหนูทั้งหมดในอวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอีลิปต์คือ ชนิดของสารหนูในดิน ระยะเวลาที่เพาะปลูก และอวัยวะส่วนต่างๆ ของกกอีลิปต์ ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลคือ As(V) มากกว่า As(III) และค่อยสะสมจากวันแรกไปจนสูงที่สุดในวันที่ 30 แล้วจึงค่อยๆ ลดลง สำหรับความเข้มข้นทางชีวภาพที่บ่งชี้การเป็นพืชไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์ คือค่าความเข้มข้นทางชีวภาพมากกว่า 1 พบว่า ในดินที่ใส่ As(V) มีค่าความเข้มข้นทางชีวภาพสูงที่สุดคือ 0.9851 สำหรับดินที่ใส่ As(III) มีค่าเท่ากับ 0.7885 สำหรับปัจจัยการเคลื่อนย้ายสารหนูขึ้นสู่ส่วนเหนือดินพบว่า กกอีลิปต์จะมีการส่งผ่านปริมาณสารหนูทั้งหมด โดยกกอีลิปต์ที่ปลูกในดินที่ใส่ As(III) จะมีการส่งผ่านเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเพาะปลูก แต่ในดินที่ใส่ As(V) จะมีการส่งผ่านสูงมากในตอนแรกแล้วจะลดลงในวันที่ 30 ของการเพาะปลูก แล้วจึงค่อยๆ มีการเคลื่อนย้ายเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต โดยได้รับทุนสนับสนุนจากหลักสูตรสาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม (นานาชาติ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบัณฑิตวิทยาลัยแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และคณะเกษตรศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้การสนับสนุนการทำการทดลองจนสำเร็จด้วยดี และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่ายที่ร่วมในงานวิจัย รวมทั้งดร.น.วิชัย เทียนถาวร และคณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยามา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] จันทรเพ็ญ ชูประภาวรรณ. 2537. ปัญหาพิษสารหนู อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช. สถาบันวิจัยสาธารณสุขไทย มูลนิธิสาธารณสุขแห่งชาติ, กรุงเทพมหานคร. [Chanpen Choprapawon. 1994. Problems of arsenic toxicity at Ron Phibun district, Nakhon Si Thammarat province. National Institute of Health of Thailand, National Health Foundation, Bangkok. (in Thai)]
- [2] พันธวัศ สัมพันธ์พานิช. 2558. การฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักด้วยพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์, กรุงเทพมหานคร. [Pantawat Sampanpanish. 2015. Phytoremediation. 1st ed, Chulalongkorn University Printing House, Bangkok. (in Thai)]
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] Lukasz, J., Joanna, K., Joanna, H. and Jerzy, G. 2009. Speciation analysis of arsenic in terrestrial plants from arsenic contaminated area. *The Science of the Total Environment*, 407, 945 – 952.
- [6] Baker, A. J. M., McGrath, S. P., Reeves, R. D. and Smith, J. A. C. 2000. Metal hyperaccumulator plants: A review of the ecology and physiology of a biochemical resource for phytoremediation of polluted soil. Lewis Publications, Boca Raton.
- [7] จอมจันทร์ นทีวัฒนา. 2557. การบำบัดสารหนูโดยวิธีพืชบำบัดในดินและตะกอนดิน: กลไกและการจัดการ. *วารสารวิทยาศาสตร์ มข*, 42(4), 730 – 747. [Jomjun Nateewattana. 2014. Arsenic Phytoremediation in Soil and Sediment: Mechanism and Management. *KKU Science Journal*, 42(4), 730 – 747. (in Thai)]
- [8] สารานุกรมพันธุ์ไม้. 2560. กกอียิปต์. แหล่งข้อมูล: <https://plant.thaiorc.com>. ค้นเมื่อวันที่ 20 มิถุนายน 2560. [Encyclopedia of Plants. 2017. *Cyperus papyrus* (L.). Source: <https://plant.thaiorc.com>. Available; 20 June 2017. (in Thai)]
- [9] 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.
- [10] Gomez-Caminero, A., Howe, P., Hughes, M., Kenyon, E., Lewis, D. R., Moore, M., Ng, J., Aitio, A. and Beking, G. 2001. Arsenic and Arsenic Compounds. World Health Organization. Geneva.
- [11] Quaghebeur, M. and Rengel, Z. 2005. Arsenic speciation governs arsenic uptake and transport in terrestrial plants. *Microchimica Acta*, 151, 141 - 152.
- [12] Kabata-Pendias and Pendias. 1984. Trace Elements in Soil and Plants. CRC Press Inc. Boca Raton.
- [13] O'Neill, P. 1990. Arsenic in Heavy Metals in Soils. Blackie and Son Ltd. Scotland and London.
- [14] 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.
- [15] Fayiga, A. O., Ma, L. Q., Santos, J., Rathinasabapathi, B., Stamps, B. and Littell, R. C. 2005. Effects of arsenic species and concentrations on arsenic accumulation by different fern species in a hydroponic system. *International Journal of Phytoremediation*, 7, 231 – 240.
- [16] Liu, W. J., Zhu, Y. G., Smith, S. 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.
- [17] Smith, E., Luhasz, A. L., Weber, J. and Naidu, R. 2008. Arsenic uptake and speciation in rice plants grown under greenhouse conditions with arsenic contaminated irrigation water. *The Science of the Total Environment*, 392, 277 – 283.
- [18] Zhang, W., Yong, C., Cong, T. and Lena, Q.M. 2002. Arsenic speciation and distribution in an arsenic hyperaccumulating plant. *The Science of the Total Environment*, 300, 167-177.
- [19] 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.
- [20] Ma, L. Q., Komar, K. M., Tu, C., Zhang, W., Cai, Y. and Kennelley, E. D. 2001. A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, 6820, 409 – 579.
- [21] Francesconi, K., Visoottiviseth, P., Sridokchan, W. and Goessler, W. 2002. Arsenic species in an arsenic hyperaccumulating fern, *Pityrogramma calomelanos*: a potential phytoremediator of arsenic – contaminated soils. *The Science of the Total Environment*, 284, 27 – 35.