

ความสัมพันธ์และผลกระทบของพีเอช ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน – รีดักชันและ ปริมาณของธาตุต่อการบำบัดสารหนู โดยกกอียิปต์ในสภาพดินน้ำขัง

The relationship and impact of pH, ORP, and elemental contents on arsenic remediation by *Cyperus papyrus* (L.) under submerged soil conditions

จอมจันทร นทีวัฒนา^{1*}, ศิริเพ็ญ ตรัยไชยาพร², มะลิวัลย์ แซ่อู่^{3,4}, สมพร ชุนห์ลือชานนท์³
และประศักดิ์ ถาวรยุติกการณ⁵

Jomjun Nateewattana^{1*}, Siripen Trichaiyaporn², Maliwan Saecouy^{3,4}, Somporn Choonluchanon³
and Prasak Thavornyutikarn⁵

¹ สหสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (นานาชาติ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย

² ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200 ประเทศไทย

³ ภาควิชาปฐพีศาสตร์และอนุรักษศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200 ประเทศไทย

⁴ โครงการจัดตั้งวิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล อำเภอเมือง จังหวัดอำนาจเจริญ 37000 ประเทศไทย

⁵ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200 ประเทศไทย

¹ Interdepartment of Environmental Management (International), Chulalongkorn university, Bangkok, 10330 Thailand

² Department of Biology, Science Faculty, Chiangmai University, Chiangmai province, 50200 Thailand

³ Department of Soil Science and Conservation, Agriculture Faculty, Chiangmai University, Chiangmai province, 50200. Thailand

⁴ Mahidol University Amnatcharoen Campus, Amnatcharoen province, 37000 Thailand

⁵ Department of Chemistry, Science Faculty, Chiangmai University, Chiangmai province, 50200 Thailand

บทคัดย่อ

การบำบัดสารหนูในพื้นที่ชุ่มน้ำมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบนิเวศ วิธีพืชบำบัดมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อียิปต์สามารถดูดสะสมสารหนูจากดินมาสะสมในปริมาณมาก วัตถุประสงค์การศึกษาเพื่อศึกษาความสัมพันธ์และผลกระทบของพีเอช ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน และปริมาณของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เหล็กที่สกัดได้ อะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ต่อการบำบัดสารหนูโดยกกอียิปต์ในสภาพดินน้ำขัง งานวิจัยนี้เป็นแบบแฟคทอเรียล 3 × 4 แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) ศึกษา 2 ปัจจัยได้แก่ ชนิดของสารหนูประกอบด้วย อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเต และจำนวนวันที่เพาะปลูกได้แก่ 15, 30, 45 และ 60 วัน ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้สถิติ วิธีดีเอ็มอาร์ที (DMRT) พบว่า ค่าเฉลี่ยศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน ปริมาณสารหนูที่กกอียิปต์ดูดสะสม แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และเหล็กที่สกัดได้ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละชุดดิน (P-value < 0.01) ค่าเฉลี่ยพีเอชและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดดินที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเตกับดินชุดควบคุม (P-value < 0.01 และ 0.05) ค่าเฉลี่ยฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และอะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ไม่มีความแตกต่างในดินทั้ง 3 ชุดอย่างมีนัยสำคัญ ผลการเปลี่ยนแปลงในแต่ละชุดดินในระยะเวลาเพาะปลูก 60 วันพบว่า พีเอช ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เหล็กที่สกัดได้ อะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละเวลาของการเพาะปลูก (P-value < 0.01) ผลการเปรียบเทียบระหว่างดินทั้ง 3 ชุดในแต่ละเวลาเพาะปลูกพบว่า ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน ปริมาณสารหนูที่กกอียิปต์ดูดสะสม เหล็กที่สกัดได้ อะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทุกช่วงเวลาเพาะปลูก (P-value < 0.01) พีเอชไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในวันที่ 15 และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในวันที่ 15 และ 30 (P-value < 0.01 และ 0.05) การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณแสดงว่า ปัจจัยที่มีผลร่วมใช้พยากรณ์ปริมาณการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของกกอียิปต์ได้แก่ ชนิดของสารหนู ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน พีเอช และวันที่เพาะปลูก โดยสามารถร่วมกันพยากรณ์ได้ร้อยละ 85.2 สมการทำนายการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของกกอียิปต์เท่ากับ $-339.542 + 20.249$ (ชนิดของสารหนู) $- 0.322$ (ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน) $+ 52.681$ (พีเอช) $- 0.987$ (วันที่เพาะปลูก)

คำสำคัญ: สารหนู, อาร์เซนไนต์, อาร์เซนเต, กกอียิปต์, ดินน้ำขัง

ABSTRACT

Arsenic remediation in wetlands is very important to the ecosystem. Phytoremediation efficiency is high and environment-friendly. *Cyperus papyrus* (L.) can highly selective accumulation arsenic from soil in large quantities. This objective study aimed to investigate variation of pH, redox potential, available phosphorus, extractable iron, exchangeable aluminum, exchangeable calcium and exchangeable magnesium for arsenic remediation in submerged soil by *C. papyrus* (L.). Experimental design was a 3×4 factorial design in a completely randomized experiment (CRD) included two factors. The first factor was the arsenic speciation consisting of arsenite and arsenate. The second factor was the cultivation periods of *C. papyrus* (L.) including 15, 30, 45 and 60 days. The result indicated that the mean comparison using DMRT of redox potential, total arsenic accumulation of *C. papyrus* (L.), exchangeable calcium and extractable iron were significantly different among all soil treatment groups (P -value < 0.01). The pH mean and exchangeable magnesium content were significantly different between arsenite and arsenate treated soil with control soil (P -value < 0.01 and 0.05). The amounts of available phosphorus and exchangeable aluminum were not significantly different among all soil types. The variation in group of three soil types during cultivation period 60 days showed that pH, redox potential, available phosphorus, extractable iron, exchangeable aluminum, exchangeable calcium and exchangeable magnesium were statistically significant (P -value < 0.01). The results of comparison among three treatment soils at each cultivating period demonstrated that redox potential, total arsenic accumulation, extractable iron, exchangeable aluminum, exchangeable calcium and exchangeable magnesium were significantly different among all cultivation periods (P -value < 0.01). pH was no significant difference on 15 days and available phosphorus was significant difference on 15 and 30 days (P -value < 0.01 and 0.05). Multiple regression analysis indicated that predictive factors of total arsenic accumulation of *C. papyrus* (L.) were arsenic speciation, redox potential, pH, and cultivation period. The model explained 85.2% in the regression model. The regression model was $-339.542 + 20.249$ (arsenic speciation) $- 0.322$ (Eh) $+ 52.681$ (pH) $- 0.987$ (cultivating day).

KEYWORDS: Total Arsenic, Arsenite, Arsenate, *Cyperus papyrus* (L.), Submerged Soil

*Corresponding Author: jomjun_102@hotmail.com

Received: 18/05/2023; Revised: 18/02/2024; Accepted: 12/12/2024

1. บทนำ

สารหนู (Arsenic, As) มีพิษร้ายแรงส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม การเกิดพิษแบ่งเป็นแบบเรื้อรังและเฉียบพลัน มนุษย์รับสารหนูจากน้ำและอาหารที่ปนเปื้อน ร่วมกับการสัมผัสสิ่งปนเปื้อนที่มาจากธรรมชาติโดยการฟุ้งของหินและแร่ธาตุต่างๆ กระจายสู่สิ่งแวดล้อม การปนเปื้อนมีสาเหตุมาจากกิจกรรมของมนุษย์เป็นหลัก ซึ่งเป็นปัญหารุนแรงในหลายประเทศ การบำบัดทางเคมีและกายภาพมีข้อจำกัด เนื่องจากรูปแบบการทิ้งสิ่งปนเปื้อนสารหนูและรูปแบบการกระจายไปในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในพื้นที่ชุ่มน้ำ สารหนูอนินทรีย์พบมาก ร้อยละ 90 ในสิ่งแวดล้อม โดยแบ่งเป็นชนิดหลักคือ อาร์เซไนต์ [Arsenite, As(III)] และอาร์เซเนต [Arsenate, As(V)] สารหนูแต่ละชนิดมีร่อยทางการเคลื่อนย้าย (fates) และพฤติกรรมทางเคมีในสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน เช่น พฤติกรรมการดูดและคายสารหนูในดิน การเปลี่ยนแปลงสถานะส่งผลต่อลักษณะความเป็นพิษของสารหนู บ่งชี้ถึงความเสี่ยงต่อการดูดสะสมของพืชและการกระจายสู่ห่วงโซ่อาหาร ความเข้มข้นของสารหนูแต่ละชนิดจึงขึ้นกับกระบวนการเปลี่ยนรูปและกระบวนการดูดและคายในดิน

ซึ่งทั้ง 2 กระบวนการนี้มีปฏิสัมพันธ์กันและดำเนินการร่วมกันจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล (Zeng et al., 2011) นอกจากนี้ปฏิกิริยาตกตะกอนและการละลายของสารหนูก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับปริมาณสารหนูในดิน ซึ่งทั้งหมดเกี่ยวข้องกับปัจจัยความเป็นกรด-ด่าง (pH) และศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน (Eh) ซึ่งพบว่า อาร์เซเนตเป็นรูปเด่นที่พบในสภาวะออกซิเดชัน จะเกิดการดูดสะสมรวมกับสารประกอบหลากหลายชนิดของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) และไอเอิร์นออกไซด์ (Iron oxide) อย่างแข็งแรง ปริมาณสารหนูในดินลดลง ขณะที่อาร์เซไนต์เป็นรูปเด่นในสภาวะรีดักชัน อาร์เซไนต์มีความสามารถในการละลายต่ำกว่าอาร์เซไนต์ และอาร์เซไนต์มีการดูดซับน้อย ทำให้ปริมาณสารหนูในดินสูงขึ้น องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในดินมีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณสารหนูซึ่งประกอบด้วยเหล็ก อะลูมิเนียม แคลเซียม แมกนีเซียม และฟอสฟอรัส (Claes et al., 2013)

ฟอสฟอรัส (Phosphorus, P) เป็นธาตุที่มีผลกระทบต่อปริมาณสารหนูในดิน รูปหลักที่พบได้แก่ ฟอสเฟต (Phosphate, PO_4^{3-}) ซึ่งมีลักษณะทางเคมีคล้าย

อาร์เซนิต จึงเกิดการแข่งขันกันก่อพันธะในตำแหน่งเดียวกันในดิน นอกจากนี้ฟอสเฟตสามารถละลายน้ำได้ดี และยังสัมพันธ์กับความเข้มข้นของเหล็กในดิน โดยการเพิ่มการละลายแบบรีดักชันของไอเอิร์นออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (Fe oxy-hydroxide) ชนิดต่าง ๆ ที่เป็นตัวดูดซับที่แข็งแรงของ สารหนู ทำให้ฟอสเฟตและอาร์เซนิตละลายออกมาเพิ่มขึ้น (Bolan et al., 2013) การเพิ่มธาตุอาหารในดินเป็นสาเหตุการแข่งขันระหว่างธาตุ การใส่ปุ๋ยกระทบต่อปริมาณสารหนูในดิน ปริมาณฟอสฟอรัสและชนิดของพืชส่งผลต่อการสะสมสารหนูของพืช ซึ่งลักษณะการเกิดพิษและการแข่งขันจะขึ้นกับชนิดของพืช แคลเซียมมีปริมาณแตกต่างกันตามชนิดของดิน ตามธรรมชาติแคลเซียมพบได้ 4 รูป โดยรูปที่เป็นแคลเซียมในสารละลายดินเป็นรูปที่มีประโยชน์ต่อพืช เพราะพืชสามารถนำไปใช้ได้ ทั้งนี้แคลเซียมสามารถเปลี่ยนรูปไปมาระหว่างกันได้ (Signes-Pastor et al., 2007) สารหนูไม่เกิดการเคลื่อนย้ายในดินจากการก่อตัวของตะกอนแคลเซียม - สารหนู (Ca - As precipitates) โดยจะตกตะกอนเป็นแคลเซียมอาร์เซนิต [Calcium arsenite, CaHAsO_3] และแคลเซียมอาร์เซนเต [Calcium arsenate, $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$] เมื่ออยู่ในสภาวะที่พีเอชสูง การตกตะกอนเหล่านี้จะลดการชะสารหนูในดิน (Deok et al., 2004) ปริมาณสารหนูสูงเมื่อพีเอชเป็นด่าง เนื่องจากการแข่งขันก่อพันธะบนพื้นผิวกับไฮดรอกซิลไอออน (Hydroxide ion, OH^-) ทำให้ปริมาณสารหนูถูกคายออกมา แม้ว่าจะเกิดการตกตะกอนร่วมกับแคลเซียมและแมกนีเซียม ณ พีเอชสูง ส่งผลต่อการลดปริมาณสารหนูลดลงควบคู่กัน (Amita et al., 1999) ขณะที่พีเอชเป็นกรด ปริมาณสารหนูเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจาก อาร์เซนิตเป็นตัวเพิ่มโปรตอน ทำให้เกิดการคายสารหนูออกมา (Claes et al., 2013) แมกนีเซียมในดินจะมีอิทธิพลต่อไอออนประจุบวกในดิน (Shree, 2018) แมกนีเซียมเกิดการก่อตัวกับสารหนูเป็นรูปที่ไม่ละลายโดยการตกตะกอนเป็นแมกนีเซียมอาร์เซนิต [Magnesium arsenite, $\text{Mg}(\text{HAsO}_3)$] และแมกนีเซียมอาร์เซนเต [Magnesium arsenate, $\text{Mg}(\text{HAsO}_4)$] และเกิดการตกตะกอนร่วมโดยเกิดการดูดซับบนผิวตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ [Magnesium hydroxide, $\text{Mg}(\text{OH})_2$] แยกจากสารละลายดิน โดยประสิทธิภาพในการตกตะกอนและการดูดซับ อาร์เซนิต

น้อยกว่าอาร์เซนิต เมื่อพีเอชน้อยกว่า 7.5 (Ghosh et al., 2003)

อะลูมิเนียมและไอเอิร์นออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (Al and Fe oxy-hydroxide) มีความสำคัญในการดูดซับสารหนูในดินและตะกอนดิน ควบคุมปฏิกิริยาดูดและคายของอาร์เซนิต ซึ่งมีประจุพื้นผิวเป็นลบเช่น H_2AsO_4^- หรือ HAsO_4^{2-} เมื่อพีเอชต่ำสารหนูถูกคายออกมาง่ายขึ้นสำหรับอาร์เซนิตซึ่งปรากฏเป็นรูปที่ไม่มีประจุเช่น H_3AsO_3 สามารถละลายได้มากกว่าและมีการดูดซับน้อยกว่าในรูปอาร์เซนิต ความเข้มข้นสารหนูซึ่งถูกละลายจึงขึ้นกับการรีดักชัน ซึ่งก่อให้เกิดอาร์เซนิตที่มีพิษมากกว่าอาร์เซนิต ชนิด องค์ประกอบ และหมู่ฟังก์ชันของแร่เหล็กและอะลูมิเนียมมีผลกระทบแบบแข่งขันต่อการดูดซับสารหนู ตามปกติอัตราการคายต่ำกว่าอัตราการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับเป็นการก่อพันธะแบบไม่ย้อนกลับ การปลดปล่อยจึงลดลงพร้อมกับเพิ่มการคงค้าง สารหนูแพร่ได้ช้าในเนื้อดิน นอกจากนี้ยังมีการตกตะกอนสารหนูในเฟสของแข็งและการจับกับโลหะจำพวกลิแกนด์และคีเลตก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนโลหะ (Complexing reaction) โดยการคงค้างจะขึ้นกับเวลา (Ghosh et al., 2003) การเกิดออกซิเดชัน - รีดักชันของเหล็กมีผลกระทบต่อการเคลื่อนตัวของสารหนู ความเข้มข้นสารหนูจะสูงขึ้นจากการละลายแบบรีดักทีฟ (reductive) ของไฮดรรัสไอเอิร์นออกไซด์ (Hydrous Fe oxide) แล้วปลดปล่อยสารหนูที่ถูกดูดซับหรือก่อพันธะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของสารหนูในตะกอนดิน โดยการปลดปล่อยอาร์เซนิตและอาร์เซนิต ซึ่งอาร์เซนิตถูกดูดซับแข็งแรงน้อยกว่าอาร์เซนิต (Masscheleyn et al., 1991)

การศึกษางานวิจัยนี้มีความสำคัญมาก เนื่องจากการใช้พืชบำบัดเป็นวิธีที่มีลักษณะพิเศษคือ พืชสามารถสะสมสารพิษได้อย่างต่อเนื่องและสามารถเปลี่ยนรูปสารหนูที่มีความเป็นพิษสูงคืออาร์เซนิตให้มีความเป็นพิษลดลงกลายเป็นอาร์เซนิตในต้นพืช รวมทั้งเป็นแนวป้องกันสารพิษแพร่กระจายตามธรรมชาติ อีกทั้งการเก็บสะสมในพืชลดการแพร่กระจายสารพิษในวงกว้างต่างจากวิธีทางเคมีและกายภาพหลายวิธี การจัดการในขั้นตอนสุดท้ายเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า การปนเปื้อนสารหนูในประเทศประสบปัญหารุนแรงในหลายพื้นที่ สารหนูถูกจัดเป็นธาตุที่พิษสูงสุด จึงเป็นความจำเป็นที่จะต้องทำ

การบำบัดแก้ไข เพื่อลดการเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร เช่น เหมือง ถ่านหิน อุตสาหกรรมต่างๆ ที่ใช้สารหนู การใช้สารเคมีทางการเกษตร การหาพืชน้ำที่ลักษณะเป็นพืชโผล่พ้นน้ำ (emerged plant) มีความสำคัญต่อการบำบัดในพื้นที่ชุ่มน้ำบริเวณใกล้แหล่งมลพิษ พืชวงศ์กกเป็นพืชที่มีหลายสายพันธุ์ มีความทนทาน ชีวมวลสูง และดูดสะสมสารหนูได้ดี จึงมีการนำมาศึกษาในครั้งนี้ ในประเทศไทยมีนักวิจัยที่ได้นำพืชหลายชนิดมาทำการบำบัดสารหนูเช่น ฤๅษี พุทธรักษา บอน ธรรมรักษา และคล้าน้ำ (Ekkasit et al., 2002) ในต่างประเทศได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางโดยพบว่า เฟิร์นเป็นพืชที่สะสมสารหนูแบบไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์ (hyperaccumulator) และมีการศึกษาเปลี่ยนรูปสารหนูจากอาร์เซนไนต์เป็นอาร์เซนเต เพื่อลดความเป็นพิษลง (Rahman et al., 2008) ธาตุต่างๆ ที่นำมาศึกษาผลกระทบครั้งนี้เป็นธาตุหลักที่มีผลกระทบต่อกระบวนการดูดสะสมสารหนูของพืชโดยตรง และพบมากในสิ่งแวดล้อม การศึกษามากมายพบว่า ฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตมีลักษณะทางเคมีคล้ายอาร์เซนเต จึงมีลักษณะแข่งขันกันโดยตรง สำหรับเหล็ก อะลูมิเนียม แคลเซียม และแมกนีเซียมมีผลต่อการดูดและคายสารหนูจากดินเนื่องจากธาตุเหล่านี้ ทำให้สารหนูไม่เคลื่อนย้ายจากดินสู่พืช ซึ่งมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องและมีการศึกษาผลกระทบของธาตุเหล่านี้อย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตามธาตุอื่นๆ ที่มีผลกระทบระดับรองลงมาจะได้ทำการศึกษาต่อไปในอนาคต สำหรับการศึกษาในรายงานนี้เป็นการศึกษาระยะที่สอง โดยระยะแรกได้ทำการศึกษากายภาพของกอกอียิปต์ในการดูดสะสมสารหนูอนินทรีย์ชนิดอาร์เซนไนต์และอาร์เซนเตในดินน้ำขังพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมสารหนูทั้งหมดของกอกอียิปต์คือ ชนิดของสารหนู และจำนวนวันที่เพาะปลูก กอกอียิปต์สะสมสารหนูทั้งหมดจากดินที่ใส่อาร์เซนเตมากกว่าดินที่ใส่อาร์เซนไนต์ วันที่สะสมสูงสุดคือวันที่ 30 ของการเพาะปลูก รากเป็นส่วนที่มีการสะสมสูงสุด โดยพืชมีการเคลื่อนย้ายสารหนูไปสะสมในส่วนเหนือดิน และอาร์เซนไนต์มีผลต่อการลดลงของน้ำหนักรากของกอกอียิปต์มากกว่าอาร์เซนเต (Jomjun et al., 2018) วัตถุประสงค์ในการศึกษาค้างนี้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์และผลกระทบของพืช ศึกษากายภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันและปริมาณของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ เหล็กที่สกัดได้ อะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้

แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ต่อการบำบัดสารหนูโดยกอกอียิปต์ในสภาพดินน้ำขัง

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ดินตัวอย่างเตรียมจากดินนาจากอำเภอดง จังหวัดเชียงใหม่ นำมาตากลมให้แห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร กอกอียิปต์ใช้ตัวอย่างจากแหล่งน้ำธรรมชาติในพื้นที่อำเภอดง จังหวัดเชียงใหม่ ทำการวิเคราะห์สารหนูในดินและพืชตัวอย่างก่อนทดลองรูปแบบการทดลองเป็นแบบแฟคทอเรียล 3×4 ในแบบแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design) เนื่องจากการศึกษาอิทธิพลร่วม (interaction) ระหว่างปัจจัย โดยประกอบด้วย 2 ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ดินที่ใส่สารหนูอนินทรีย์ชนิดอาร์เซนไนต์ [As(III)] และอาร์เซนเต [As(V)] และดินชุดควบคุม และจำนวนวันที่เพาะปลูกได้แก่ 15, 30, 45 และ 60 วัน ทดลองจำนวน 3 ซ้ำ โดยใช้โซเดียมอาร์เซนไนต์ (Sodium arsenite, NaAsO_2) และไดโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซนเต (Disodium hydrogen arsenate heptahydrate, $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ที่ความเข้มข้น 175 mg kg^{-1} นำมาคลุกเคล้ากับดินจำนวน 5 กิโลกรัมต่อกระถาง กระถางมีขนาด 12×12 นิ้ว ทำการเพาะปลูกตามแผนการทดลองเมื่อครบกำหนดเวลาเพาะปลูกแต่ละครั้ง นำพืชมาล้างให้สะอาด ชั่งน้ำหนัก แล้วจึงนำไปอบให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ นำมาบด เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ ตัวอย่างดินทำการเก็บที่ระดับต่ำกว่าผิวดิน 15 เซนติเมตร นำไปอบจนแห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรง 2 มิลลิเมตร เก็บในถุงพลาสติกแห้งสนิท เพื่อนำมาวิเคราะห์ต่อไป

2.2 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

การวิเคราะห์ความเป็นกรดต่าง (pH) และศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน - รีดักชัน (Eh) ใช้เครื่องมือตรวจวัดในพื้นที่ (in situ) ได้แก่ pH meter; Takemura รุ่น DM-13 และ Eh meter; Hanna รุ่น HI-98331 การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P: Pav) ใช้วิธี Bray II สกัดดินด้วยสารสกัดกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) 0.1 N และแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (Ammonium fluoride, NH_4F) 0.03 N ตรวจวัดหาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสด้วยวิธีโมลิบดีนัมบลู (Molybdenum blue) (Abdul et al., 2001) การวิเคราะห์แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Ca และ Mg, Caex และ Mgex) ใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโตรมิเตอร์

(Atomic Absorption Spectrometer, AAS) สกัดดินด้วย แอมโมเนียมอะซิเตต (Ammonium acetate, $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{CO}_2$) และแลนทานัม (Lanthanum) 0.2% วิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวัดเชิงแสง (Flame photometer) ความยาวคลื่นที่ตรวจวัดของแคลเซียมและแมกนีเซียมเท่ากับ 422.7 nm และ 285.2 nm (Abdul et al., 2001)

การวิเคราะห์อะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Al, Alex) ด้วยวิธีสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) สกัดดินโดยใช้พอลิเอทิลีน (Polyethylene, $\text{CH}_2=\text{CH}_2$) และแอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride, NH_4Cl) ทำปฏิกิริยากับ 1% ของ 8-ไฮดรอกซีควิโนลีน (8-Hydroxyquinoline, $\text{C}_{18}\text{H}_{13}\text{CuN}_2\text{O}$) และไฮดรอกซีลามีน ไฮโดรคลอไรด์ (Hydroxylamine hydrochlorid, $\text{NH}_2\text{OH}.\text{HCl}$) ร่วมกับ โซเดียมอะซิเตต (Sodium acetate, NaOAc) ใน สารละลาย ฟีนานทรีน (Phenanthroline, $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2$) 0.2% ตรวจวัดที่ 395 nm (Abdul et al., 2001) การวิเคราะห์เหล็กที่สกัดได้ (Extractable Fe: Feext) ด้วยวิธี ดีทีพีเอ (DTPA) โดยการสกัดดินด้วยสารละลายดีทีพีเอ (DTPA) 0.005 M ซึ่งประกอบด้วยสารละลายดีทีพีเอ (DTPA) 0.005 M, แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, CaCl_2) 0.005 M และไตรเอทานอลามีน (Triethanolamine, TEA) 0.1 M ณ พีเอช 7.30 วัด ปริมาณด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer, AAS) (Abdul et al., 2001) การวิเคราะห์ปริมาณสารหนู ทั้งหมด (Total As) ด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโตรมิเตอร์ - ไฮไดรด์ (Atomic Absorption Spectrometer hydride, AAS - hydride) สกัดโดย โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide, KI) 10% ตรวจวัดที่ 193.7 nm (America Water Work Association Water Environment Federation, 1998)

2.3 การวิเคราะห์สถิติ

วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ดังนั้น ค่าเฉลี่ย (mean) การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) สหสัมพันธ์ เพียร์สัน (Pearson correlation) และการถดถอยพหุคูณ แบบขั้นตอน (Stepwise Multiple Regression Analysis) (Stevens, 1992) ดังนี้

สมการสหสัมพันธ์เพียร์สันแสดงในสมการที่ 1

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \dots\dots (1)$$

โดย r แทน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของข้อมูล

ตัวแปร X และ Y จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1

ถ้า $r = 1$ หมายความว่า ตัวแปร X และ Y มีความสัมพันธ์เชิงบวกแบบตามกันโดยสมบูรณ์

ถ้า $r = 0$ หมายความว่า ตัวแปร X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

ถ้า $r = -1$ หมายความว่า ตัวแปร X และ Y มีความสัมพันธ์เชิงลบกันโดยสมบูรณ์

สมการการถดถอยพหุคูณแสดงในสมการที่ 2

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_iX_i \dots + b_nX_n \dots (2)$$

โดย i = จำนวนตัวอย่างเท่ากับ n, Y = ตัวแปรตาม, X = ตัวแปรต้น, b_0 = ค่าคงที่, b_p = ค่า slope coefficients จากนั้นพิจารณาสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ (coefficient of determinant, R) ซึ่งเป็นดัชนีที่บอกถึงร้อยละของการเปลี่ยนแปลงในตัวแปรตามที่มีผลมาจากตัวแปรอิสระทุกตัว โดยจะใช้ค่า $\text{Adj } R^2$ เป็นสัมประสิทธิ์การตัดสินใจว่า ตัวแปรอิสระสามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตามได้ร้อยละเท่าไร การเขียนรูปแบบของสมการถดถอยจากค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากตารางค่าสัมประสิทธิ์ (Table of coefficients)

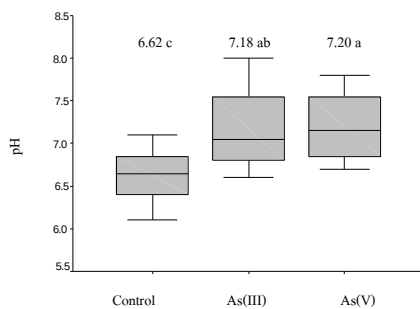
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ข้อมูลทั่วไป ค่าสถิติพื้นฐานและการประมาณค่าเฉลี่ยของปัจจัยแต่ละปัจจัย

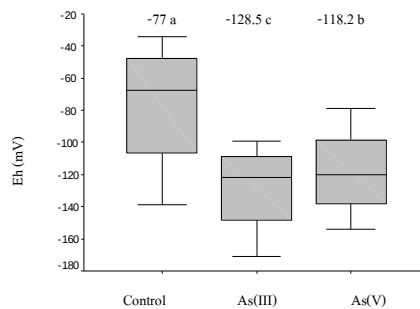
จากรูปที่ 1 พบว่า ดินชุดควบคุมมีพีเอชต่ำกว่าดินชุดที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเต ค่าเฉลี่ยพีเอชเรียงตามลำดับดังนี้ ดินที่ใส่อาร์เซนเต > ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์ > ดินชุดควบคุม มีค่าเฉลี่ย 7.20, 7.18 และ 6.63 ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์มีค่าการกระจายข้อมูลสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธีดีเอ็มอาร์ที (DMRT) พบว่า ดินชุดที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเต อยู่ในกลุ่มเดียวกันและแตกต่างจากดินชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.01$) ดินน้ำขังตามปกติค่าพีเอชจะเข้าใกล้ 7 จากรูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของพีเอชระหว่าง 0 ถึง 60 วันของดินแต่ละ

ชุดได้แก่ ดินชุดควบคุม ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเนต มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.01$) การเปลี่ยนแปลงของพีเอชระหว่างวันที่ 0 ถึง 60 เมื่อเปรียบเทียบแต่ละเวลาเพาะปลูกคือ 0, 15, 30, 45, 60 วัน ระหว่างดินทั้ง 3 ชุดพบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.01$) ในวันที่ 45 และ 60 ขณะที่ในวันที่ 15 พีเอชของดินทั้ง 3 ชุด ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} = 0.079$) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงพีเอชของดินชุดควบคุมใน 60 วันของการ

เพาะปลูก พบว่า พีเอชเพิ่มขึ้นจนถึงวันที่ 60 มีค่าเท่ากับ 7 เนื่องจากเป็นดินน้ำขัง ซึ่งดินชุดควบคุมมีพีเอชเท่ากับ 7 แต่ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเนต มีค่าพีเอชมากกว่า 7 โดยดินที่ใส่อาร์เซนไนต์ พบว่า พีเอชค่อยๆ เพิ่มขึ้นจาก 6.5 ในวันที่ 0 เป็น 7.9 ในวันที่ 60 ของการเพาะปลูก ขณะที่ดินที่ใส่อาร์เซนเนต พีเอชค่อยๆ เพิ่มขึ้นจาก 6.7 ในวันที่ 0 จนมีค่าเท่ากับ 7.7 ในวันที่ 60 ของการเพาะปลูก โดยพบว่า แนวโน้มพีเอชของดินที่ใส่อาร์เซนไนต์สูงกว่าดินที่ใส่อาร์เซนเนต เมื่อผ่านไป 45 วัน



รูปที่ 1 พีเอชของดิน

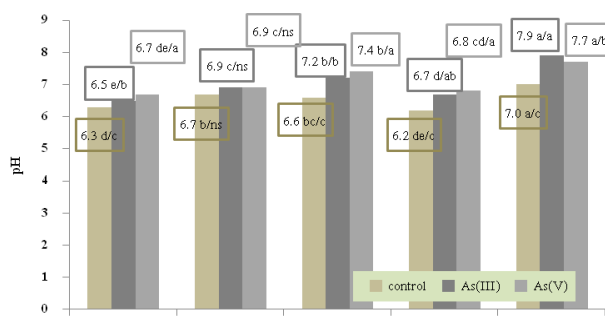


รูปที่ 2 ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของดิน (mV)

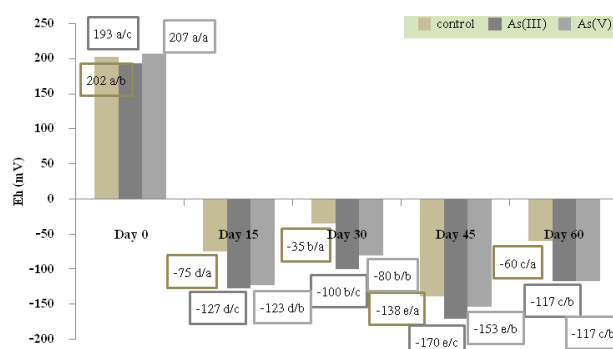
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากรูปที่ 2 ตามธรรมชาติดินน้ำขังค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันอยู่ในสภาวะรีดักชัน เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพบว่า ดินชุดควบคุม > ดินที่ใส่อาร์เซนเนต > ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -77, -118.2 และ -128.5 mV ตามลำดับ ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของดินชุดควบคุมมีการกระจายข้อมูลมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธีดีเอ็มอาร์ที (DMRT) พบว่า ดินทุกชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.01$) จากรูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันระหว่าง 0 ถึง 60 วันของดินแต่ละชุดได้แก่ ดินชุดควบคุม ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเนต มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.01$) การเปลี่ยนแปลงของศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันระหว่างวันที่ 0 ถึง 60 เมื่อเปรียบเทียบแต่ละเวลาเพาะปลูกคือ 0, 15, 30, 45, 60 วัน ระหว่างดินทั้ง 3 ชุด พบว่า มีความแตกต่าง

อย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.01$) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของดินเนื่องจากเป็นดินน้ำขังศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันเป็นบวกในวันที่ 0 เมื่อเริ่มขังน้ำจึงมีสภาวะรีดักชันเพิ่มขึ้นพบว่า ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันจะมีค่าเป็นลบ ดินชุดควบคุมศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันอยู่ในช่วง 202 ถึง -138 mV ซึ่งสูงกว่าดินชุดที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเนต ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์พบว่า มีค่าเป็นบวกในวันที่ 0 แล้วเริ่มเกิดสภาวะรีดักชัน ดินมีค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันติดลบและมีค่าเป็นลบต่ำกว่าดินชุดอื่นๆ โดยมีค่าระหว่าง 193 ถึง -170 mV ขณะที่ดินที่ใส่อาร์เซนเนตพบว่า มีค่าเป็นบวกในวันที่ 0 แล้วจึงเกิดสภาวะรีดักชัน โดยดินมีค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันติดลบ แต่มีค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันสูงกว่าดินใส่อาร์เซนไนต์ แต่น้อยกว่าดินชุดควบคุม



รูปที่ 3 พีเอชเปลี่ยนแปลงตามเวลาเพาะปลูก

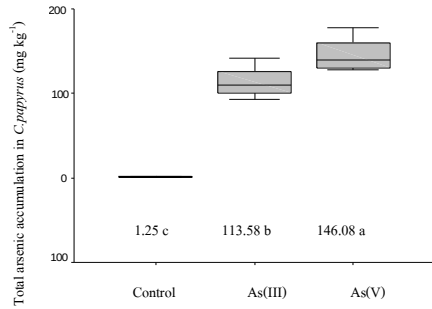
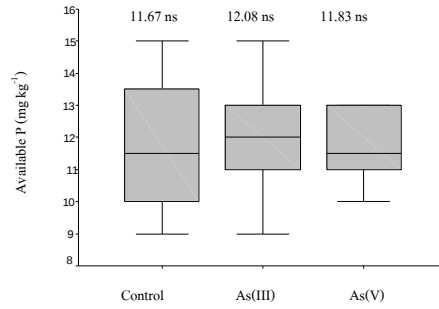


รูปที่ 4 ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน (mV) เปลี่ยนแปลงตามเวลาเพาะปลูก

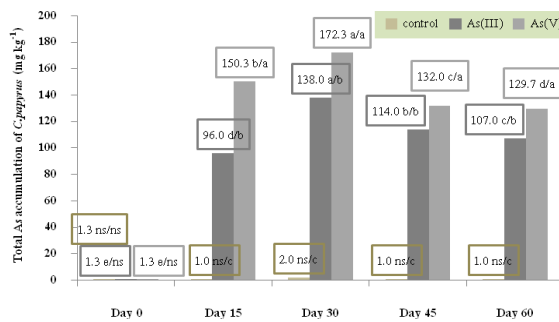
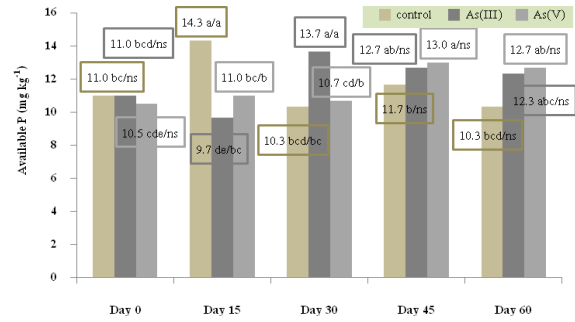
หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตัวอักษรด้านหน้าแสดงความแตกต่างระหว่าง 0 – 60 วันของดินแต่ละชุดได้แก่ ดินชุดควบคุม ดินที่ใส่อาร์เซนิตและอาร์เซไนต์ ตัวอักษรด้านหลังแสดงความแตกต่างระหว่าง 0 – 60 วัน เมื่อเปรียบเทียบแต่ละเวลาเพาะปลูกคือ 0, 15, 30, 45, 60 วันระหว่างดินทั้ง 3 ชุด

ปัจจัยของพีเอชและศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันมีผลกระทบต่อปริมาณสารหนูในดิน (Signes-Pastor et al., 2007) ปริมาณสารหนูจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการแย่งพื้นที่ก่อกวนกับไฮดรอกซิลไอออน (hydroxyl ions; OH^-) ขณะที่พีเอชสูงขึ้น สารหนูเกิดการตกตะกอนร่วมกับแคลเซียม แมกนีเซียม หรือซัลเฟต (SO_4^{2-}) จึงนำไปสู่การลดปริมาณสารหนูลงบางส่วน และเมื่อพีเอชต่ำมาก อาจเพิ่มปริมาณสารหนูได้เช่นกัน เนื่องจากอาร์เซไนต์จะกลายเป็นตัวเพิ่มโปรตอนกับอะตอมหรือโมเลกุล (protonation) ดังนั้นเมื่อพีเอชน้อยกว่า 2.5 จะนำไปสู่การเคลื่อนย้ายที่สูงขึ้น (Amita et al., 1999; Claes et al., 2013) ขณะเดียวกันเมื่อพีเอชต่ำ สารหนูจะถูกดูดซับพร้อมกับอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al oxides) และไอเอิร์นออกไซด์ (Fe oxides) อย่างแข็งแรงเช่นกัน อาร์เซไนต์เป็นรูปเด่นเมื่อพีเอช > 3 สำหรับอาร์เซไนต์เป็นรูปเด่นเมื่อพีเอช < 9 ประจุรวมของสารประกอบอาร์เซไนต์เท่ากับศูนย์ เมื่อพีเอชอยู่ระหว่าง 6 – 9 สารหนูชนิดอาร์เซไนต์มีพิษมากกว่าอาร์เซไนต์ (Petrusevski et al., 2007) โดยทั่วไปเมื่อศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-

รีดักชันสูง อาร์เซไนต์จะเป็นลักษณะเด่น ขณะที่ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันต่ำเกิดการก่อตัวของอาร์เซไนต์ที่มีการดูดซับน้อยกว่า นำไปสู่ปริมาณในสิ่งแวดล้อมที่สูงกว่า (Claes et al., 2013) ดังนั้นค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันที่เสถียรของสารหนูในรูปอาร์เซไนต์และอาร์เซไนต์จึงขึ้นกับพีเอชและศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันในสิ่งแวดล้อม เมื่อพีเอชต่ำอาร์เซไนต์เป็นรูปที่เสถียร ณ ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันระหว่าง 0 และ 500 mV ขณะที่อาร์เซไนต์มีความเสถียร เมื่อศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันสูงกว่า 500 mV เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น อาร์เซไนต์มีความเสถียรเพียงชนิดเดียว (Niagu et al., 2007; Ravenscroft et al., 2009) สารหนูละลายได้น้อยภายใต้สภาพรีดิวซ์ปานกลาง ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน 0 – 150 mV (Emil et al., 2006) เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงรีดออกซ์จะเกิดการเปลี่ยนรูปสารหนูจาก +500 mV ณ ผิวดินจนถึง -300 mV ณ บริเวณใต้ดิน กระบวนการชะสารหนูสู่น้ำท่าและน้ำใต้ดิน รวมทั้งการสะสมของพีช (Gambrell and Patrick, 1989)

รูปที่ 5 การสะสมสารหนูทั้งหมดของกอกอียิปต์ (mg.kg⁻¹)รูปที่ 6 ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (mg.kg⁻¹)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

รูปที่ 7 การสะสมสารหนูของกอกอียิปต์ (mg kg⁻¹)
เปลี่ยนแปลงตามเวลาเพาะปลูกรูปที่ 8 ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (mg kg⁻¹) เปลี่ยนแปลงตามเวลา
เพาะปลูก

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตัวอักษรด้านหน้าแสดงความแตกต่างระหว่าง 0 – 60 วันของดินแต่ละชุด ได้แก่ ดินชุดควบคุม ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเนต ตัวอักษรด้านหลังแสดงความแตกต่างระหว่าง 0 – 60 วัน เมื่อเปรียบเทียบแต่ละเวลาเพาะปลูกคือ 0, 15, 30, 45, 60 วันระหว่างดินทั้ง 3 ชุด

จากรูปที่ 5 ปริมาณการสะสมสารหนูทั้งหมด (Total arsenic) ที่กอกอียิปต์ดูดสะสมพบว่า ดินที่ใส่อาร์เซนเนตมีการสะสมมากกว่าดินที่ใส่อาร์เซนไนต์ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 146.08 และ 113.58 mg kg⁻¹ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธีดีเอ็มอาร์ที (DMRT) พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทุกชุดดิน (P-value < 0.01) จากรูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารหนูทั้งหมดที่กอกอียิปต์ดูดสะสมระหว่าง 0 ถึง 60 วันของดินแต่ละชุด ได้แก่ ดินชุดควบคุม ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเนตพบว่า ชุดควบคุมไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P-value = 0.400) แต่ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเนต มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.01) การเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารหนูทั้งหมดที่กอกอียิปต์ดูดสะสมระหว่างวันที่ 0 ถึง 60 เมื่อเปรียบเทียบแต่ละเวลาเพาะปลูก 0, 15, 30, 45, 60 วัน ระหว่างดินทั้ง 3 ชุดพบว่า มีความแตกต่างวันที่ 15 ถึง 60 วันเพาะปลูกอย่าง

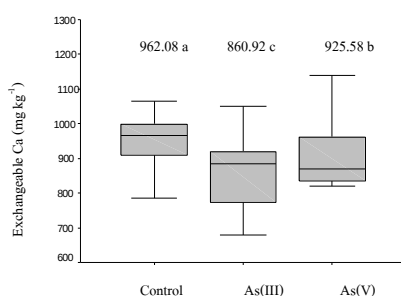
มีนัยสำคัญ (P-value < 0.01) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของดินชุดควบคุมไม่มีการเปลี่ยนแปลง สำหรับดินที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเนต ตรวจพบสูงสุดในวันที่ 30 ของการเพาะปลูกแล้วค่อยๆ ลดลง การศึกษาการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดโดยกอกอียิปต์สามารถศึกษาผลการวิจัยระยะแรกโดยละเอียดจากวารสารงานวิจัยที่ได้เผยแพร่ไป (Jomjun et al., 2018)

จากรูปที่ 6 ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P, P_{av}) เมื่อเรียงลำดับค่าเฉลี่ยพบว่า ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์ > ดินที่ใส่อาร์เซนเนต > ชุดควบคุม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.08, 11.83 และ 11.67 mg kg⁻¹ โดยดินชุดควบคุมมีการกระจายข้อมูลมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธีดีเอ็มอาร์ที (DMRT) พบว่า ดินทั้ง 3 ชุดไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-value = 0.882) จากรูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลง P_{av} ระหว่าง 0 ถึง

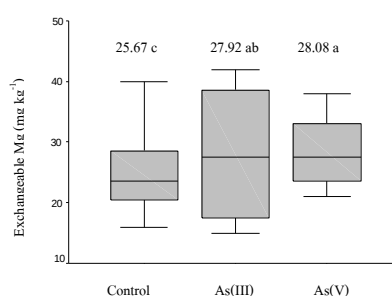
60 วันของดินแต่ละชุดได้แก่ ดินชุดควบคุม ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเต พบว่า ดินชุดควบคุมและดินที่ใส่อาร์เซนไนต์มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.01$) ดินที่ใส่อาร์เซนเตมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.05$) การเปลี่ยนแปลงปริมาณ P_{av} ระหว่างวันที่ 0 ถึง 60 เมื่อเปรียบเทียบแต่ละเวลาเพาะปลูก 0, 15, 30, 45, 60 วัน ระหว่างดินทั้ง 3 ชุดพบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของดินในวันที่ 15 และ 30 โดยมี $P\text{-value} < 0.01$ และ 0.05 ตามลำดับ แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณ P_{av} ของดินชุดควบคุมอยู่ระหว่าง $10.33 - 14.33 \text{ mg kg}^{-1}$ โดยวันที่ 15 มีปริมาณ P_{av} สูงสุด ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์พบว่า ปริมาณ P_{av} อยู่ระหว่าง $9.67 - 13.67 \text{ mg kg}^{-1}$ โดยพบสูงสุดในวันที่ 30 ของการเพาะปลูก และดินที่ใส่อาร์เซนเตพบว่า ปริมาณ P_{av} อยู่ระหว่าง $10.50 - 13.00 \text{ mg kg}^{-1}$ โดยปริมาณ P_{av} สูงสุดในวันที่ 45 ของการเพาะปลูก และปริมาณ P_{av} ของดินที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเต มีความใกล้เคียงกัน

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุหลักในการเติบโตของพืช ฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต (PO_4^{3-}) มีลักษณะทางเคมีคล้าย อาร์เซนเต ฟอสฟอรัสว่องไวมากต่อการขนส่งและการแลกเปลี่ยนในโครงสร้างดินมากกว่าอาร์เซนเต ดังนั้น ทั้ง 2 ธาตุจึงแทนที่กันได้ในปฏิกิริยาเคมีเช่น การตกตะกอน การละลาย การดูดซับ การขับออก และการแข่งขันการดูดซับในพืช (Senn et al., 2018) ฟอสฟอรัสจึงมีอิทธิพลต่อการจัดหาอาร์เซนเตในสิ่งแวดล้อม โดยอาร์เซนไนต์สามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นอาร์เซนเตในสภาพออกซิเดชัน แต่ฟอสฟอรัสไม่เปลี่ยนแปลงโดยปฏิกิริยารีดอกซ์ (Sanz et al., 2007) การเพิ่มฟอสเฟตลงในดินพบว่า อาร์เซนเตถูกดูดซับในดินลดลง เนื่องจากการ

แข่งขันกันในการกักพันธะ แต่จะไม่เกี่ยวข้องกับอาร์เซนไนต์ (Bolan et al., 2013) หากฟอสฟอรัสและสารหนูมีความเข้มข้นเท่ากัน สารหนูจะถูกสะสมในพืชมากกว่า เพราะสารหนูมีขนาดเล็กกว่า และสารหนูมีการดูดสะสมในดินต่ำกว่าฟอสฟอรัส (Zou et al., 2009) คุณสมบัติของดิน ลักษณะเนื้อดิน ชนิดและปริมาณแร่ธาตุในดิน และปัจจัยสิ่งแวดล้อมส่งผลต่อความสามารถในการจัดหาของดิน การเคลื่อนย้าย และปฏิกิริยาระหว่างสารหนูกับฟอสฟอรัสส่งผลต่อการดูดสะสมของพืช (Bissen and Frimmel, 2003) พีเอชและศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันเป็นปัจจัยที่มีบทบาทสูง (Kubicki, 2005) ความเป็นพิษของสารหนูกับพืชขึ้นกับสัดส่วนของสารหนูต่อฟอสฟอรัสมากกว่าความเข้มข้นสารหนูทั้งหมด (Lu et al., 2010) สารหนูเกี่ยวข้องกับกระบวนการเคลื่อนย้ายจากปฏิกิริยากรด-เบส การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexation) การตกตะกอน (precipitation) และสมดุลรีดอกซ์ (redox equilibrium) ปฏิกิริยาเหล่านี้แสดงความสามารถในการแผ่ขยายสารหนูสู่ธรรมชาติ (Signes-Pastor et al., 2007) การเพิ่มปุ๋ยฟอสฟอรัสในพื้นที่ที่มีฟอสฟอรัสและสารหนูพบว่า สารหนูละลายได้สูงขึ้น (Emil et al., 2006) โดยมีสมมุติฐานกลไกการปลดปล่อยสารหนูจากดินไปสู่ น้ำใต้ดิน ได้แก่ 1. สมมุติฐานออกซิเดชัน (oxidation) คือ การออกซิเดชันของอาร์เซนไคแบริ่งไพไรต์ [$\text{As bearing pyrite, Fe(S, As)}_2$] ปริมาณมากถูกถอนออกจากน้ำใต้ดิน แล้วปล่อยสู่บรรยากาศ 2. สมมุติฐานรีดักชัน (reduction) คือ การรีดักชันของสารหนูที่มีไอเอิร์นออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe - oxyhydroxides}$) และแมงกานีสออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ($\text{Mn - oxyhydroxides}$) 3. การเพิ่มปุ๋ยฟอสเฟตในดินเพื่อไปแข่งขันกับสารหนูในการดูดซับ (Emil et al., 2006)

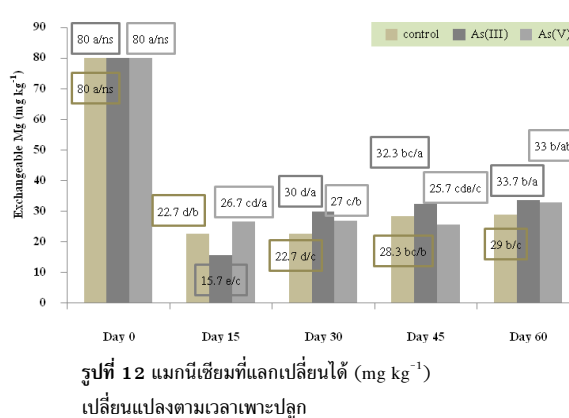
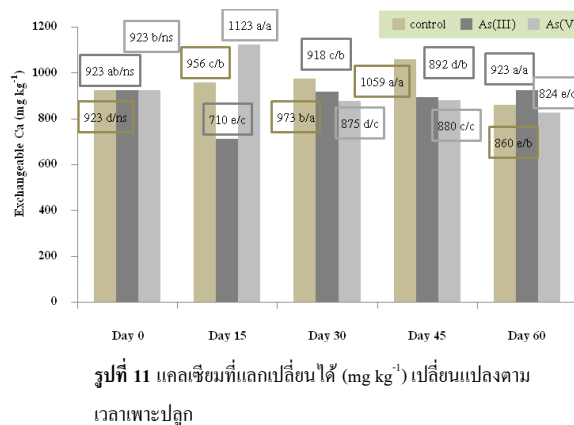


รูปที่ 9 แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน (mg.kg^{-1})



รูปที่ 10 แมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน (mg.kg^{-1})

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตัวอักษรด้านหน้าแสดงความแตกต่างระหว่าง 0 – 60 วันของดินแต่ละชุดได้แก่ ดินชุดควบคุม ดินที่ใส่อาร์เซนิตและอาร์เซเนต ตัวอักษรด้านหลังแสดงความแตกต่างระหว่าง 0 – 60 วัน เมื่อเปรียบเทียบแต่ละเวลาเพาะปลูกคือ 0, 15, 30, 45, 60 วันระหว่างดินทั้ง 3 ชุด

จากรูปที่ 9 แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Ca, Ca_{ex}) เมื่อเรียงลำดับค่าเฉลี่ยในแต่ละชุดดินพบว่า ดินชุดควบคุม > ดินที่ใส่อาร์เซนิต > ดินที่ใส่อาร์เซไนต์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 962.08, 925.58 และ 860.92 mg kg⁻¹ โดยดินชุดที่ใส่อาร์เซไนต์มีการกระจายข้อมูลมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธีวิธีดีเอ็มอาร์ที (DMRT) พบว่า ดินทุกชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P -value < 0.01) จากรูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Ca_{ex} ระหว่าง 0 ถึง 60 วันของดินแต่ละชุดได้แก่ ดินชุดควบคุม ดินที่ใส่อาร์เซนิตและอาร์เซเนต มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P -value < 0.01) การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Ca_{ex} ระหว่างวันที่ 0 ถึง 60 เมื่อเปรียบเทียบแต่ละเวลาเพาะปลูก 0, 15, 30, 45, 60 วันระหว่างดินทั้ง 3 ชุด พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P -value < 0.01) ในวันที่ 15 ถึง 60 วันของการเพาะปลูก แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณ Ca_{ex} ของดินชุดควบคุมเพิ่มขึ้นจากวันที่ 0 ถึง 45 แล้วลดลงในวันที่ 60 สำหรับดินใส่อาร์เซนิตปริมาณ Ca_{ex} ระหว่าง 0 ถึง 15 วัน ลดลงต่ำสุดเท่ากับ 710.33 mg kg⁻¹ แล้วจึงเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 710.33 – 923.33 mg kg⁻¹ ดินที่ใส่อาร์เซนิตกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นระหว่างวันที่ 0 ถึง 15 ปริมาณ Ca_{ex} มีค่าสูงสุดที่ 1,123.33 mg kg⁻¹ แล้วจึงลดลงและอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 824.33 – 1,123.33 mg kg⁻¹ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ Ca_{ex} ในดินที่ใส่อาร์เซไนต์มีค่ามากกว่าดินที่ใส่ อาร์เซนิตในเวลาเพาะปลูก 30 – 60 วัน

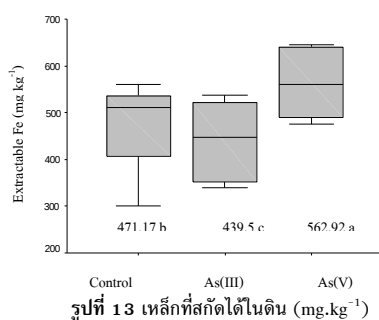
แคลเซียมไม่ใช่ธาตุอาหารจำเป็นต่อพืช (Thor, 2019) แต่ช่วยในกิจกรรมการเจริญเติบโตของพืชอย่างสำคัญ เช่น เกี่ยวข้องกับการรักษาสมดุลการดูดสะสมไอออนประจุบวกในรากพืช กระบวนการเมแทบอลิซึม และเกี่ยวข้องกับการสร้างโครงสร้างต่าง ๆ ของพืช (Mahajan et al., 2008) แคลเซียมลดความเครียดจากโลหะพิษ โดยลดการสะสมโลหะ (Thor, 2019) แคลเซียมความเป็นพิษของสารหนูและลดการเคลื่อนย้ายสารหนูในดินและน้ำ มีการใช้แคลเซียมเปอร์ออกไซด์ (Calcium Peroxide; CaO_2) และแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride; $CaCl_2$) ลดการดูดสะสมสารหนูของพืชอย่างมีประสิทธิภาพ (Fuessle and Taylor, 2004) เมื่อมีแคลเซียมปรากฏพร้อมกับฟอสฟอรัสและสารหนูจะก่อตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคลเซียม – ฟอสฟอรัส – สารหนู (Ca-P-As) ลดการเคลื่อนย้ายของธาตุทั้ง 3 ในดิน (Szegedi et al., 2010) อีกทั้งยังพบสารประกอบแคลเซียมร่วมกับกากแร่อาร์เซนิก ซึ่งสัมพันธ์กับเหล็กและแคลเซียมในกากแร่ (Signes-Pastor et al., 2007)

จากรูปที่ 10 แมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Mg, Mg_{ex}) เมื่อเรียงลำดับค่าเฉลี่ยพบว่า ดินที่ใส่อาร์เซนิต > ดินที่ใส่อาร์เซไนต์ > ดินชุดควบคุม โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.08, 27.92 และ 25.67 mg kg⁻¹ ตามลำดับดินที่ใส่อาร์เซไนต์มีการกระจายข้อมูลมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธีวิธีดีเอ็มอาร์ที (DMRT) พบว่า ดินที่ใส่สารหนูทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับดินชุดควบคุม (P -value <

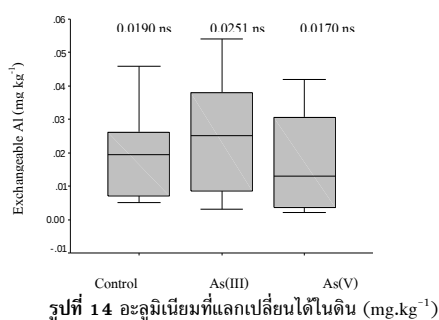
0.05) จากรูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Mg_{ex} ระหว่าง 0 ถึง 60 วันของดินแต่ละชุดได้แก่ ดินชุดควบคุม ดินที่ใส่อาร์เซนิตและอาร์เซเนต มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P -value < 0.01) การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Mg_{ex} ระหว่างวันที่ 0 ถึง 60 เมื่อเปรียบเทียบแต่ละเวลา เพาะปลูก 0, 15, 30, 45, 60 วัน ระหว่างดินทั้ง 3 ชุด พบว่า มีความแตกต่างกันในวันที่ 15 ถึง 60 วันของการเพาะปลูกอย่างมีนัยสำคัญ (P -value < 0.01) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณ Mg_{ex} พบว่า มีค่าสูงสุดในวันที่ 0 ของการเพาะปลูกเท่ากับ 80.00 mg แล้วจึงลดลงในทุกชุดดินอย่างมีนัยสำคัญ (P -value < 0.01) ปริมาณ Mg_{ex} ของดินชุดควบคุมลดลงต่ำสุดในวันที่ 15 และ 30 เท่ากับ 22.67 mg kg⁻¹ แล้วจึงเพิ่มขึ้นในวันที่ 45 และ 60 โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 22.67 – 80.00 mg kg⁻¹ ดินที่ใส่อาร์เซนิตมีปริมาณ Mg_{ex} มีค่าสูงสุดวันที่ 0 ซึ่งเริ่มมีการซังน้ำ และมีค่าต่ำสุดในวันที่ 15 เท่ากับ 15.67 mg kg⁻¹ แล้วจึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในวันที่ 30 ถึง 60 ของการเพาะปลูก โดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 60 คือ 33.67 mg kg⁻¹ ดินที่ใส่อาร์เซเนต ปริมาณ Mg_{ex} มีแนวโน้มคล้ายดินที่ใส่อาร์เซนิต โดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 0 ของการเพาะปลูก แล้วลดลงต่ำสุดในวันที่ 15 มีค่า 26.67 mg kg⁻¹ โดยหลังจากนั้นมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดในวันที่ 60 คือ 33.00 mg kg⁻¹

แมกนีเซียมมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนูอย่างกว้างขวาง นำมาผลิตเป็นตัวดูดซับ โดยปัจจุบันมีการนำอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมมาผลิตเป็นตัวดูดซับซึ่งมี

ประสิทธิภาพมากกว่าอะลูมิเนียมหรือแมกนีเซียมอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงธาตุเดียว ตัวดูดซับคอมโพสิตของอะลูมิเนียม-แมกนีเซียมออกไซด์ (Al – Mg oxide composite) มีความสามารถในการเลือกสูง มีประสิทธิภาพในการดูดซับอาร์เซนิตและอาร์เซเนตผลิตสังเคราะห์ขึ้นมาง่าย สามารถดูดซับสารหนูในช่วงกว้าง (Wei et al., 2016) กลไกการดูดซับสารหนูเกี่ยวข้องกับการก่อตัวของกลุ่ม ไฮดรอกซิล (OH^- group) (Amita et al., 1999) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ [Magnesium hydroxide; $Mg(OH)_2$] สามารถเคลื่อนย้ายสารหนูโดยการตกตะกอนอย่างมีประสิทธิภาพที่พีเอชประมาณ 7 แต่แมกนีเซียมมีประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารหนูน้อยกว่าเหล็ก ปริมาณที่เคลื่อนย้ายน้อยกว่าและใช้เวลานานกว่า แมกนีเซียมและแคลเซียมจะเคลื่อนย้ายสารหนูเพิ่มขึ้นในสารละลายดินในสภาวะดินน้ำซัง โดยทำปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายด้วยวิธีทำให้สารหนูไม่ละลายได้แก่ การตกตะกอนร่วมกับการดูดซับบนพื้นผิวตะกอน เรียกว่า การตกตะกอนร่วม โดยสารหนูและแมกนีเซียมตกตะกอนร่วมกันเป็นสารประกอบแมกนีเซียมอาร์เซเนต [Magnesium arsenate, $Mg(HAsO_4)$] และแมกนีเซียมอาร์เซนิต [Magnesium arsenite, $Mg(HAsO_3)$] และสารหนูดูดซับบนตะกอนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ [Magnesium hydroxide, $Mg(OH)_2$] (Ghosh et al., 2003) กระบวนการเคลื่อนย้ายเกิดขึ้นได้ดีเมื่อพีเอช < 7 การเคลื่อนย้ายอาร์เซเนตมีประสิทธิภาพมากกว่าอาร์เซนิต ณ พีเอช < 7.5 (Islam and Islam, 1973)

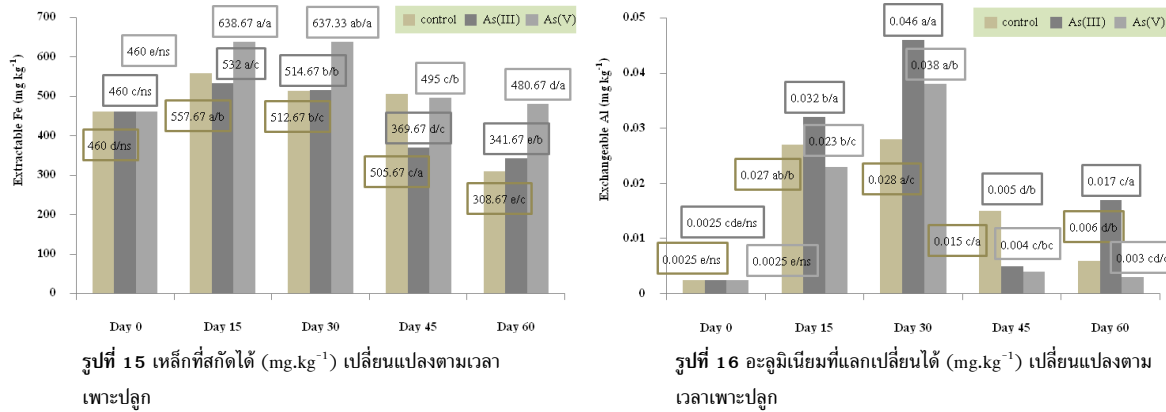


รูปที่ 13 เหล็กที่สกัดได้ในดิน (mg.kg⁻¹)



รูปที่ 14 อะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน (mg.kg⁻¹)

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ



หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตัวอักษรด้านหน้าแสดงความแตกต่างระหว่าง 0 – 60 วันของดินแต่ละชุดได้แก่ ดินชุดควบคุม ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเนต ตัวอักษรด้านหลังแสดงความแตกต่างระหว่าง 0 – 60 วัน เมื่อเปรียบเทียบแต่ละเวลาเพาะปลูกคือ 0, 15, 30, 45, 60 วันระหว่างดินทั้ง 3 ชุด

จากรูปที่ 13 เมื่อเรียงลำดับค่าเฉลี่ยปริมาณเหล็กที่สกัดได้ (Extractable Fe, Fe_{ext}) พบว่า ดินที่ใส่อาร์เซนเนต > ดินชุดควบคุม > ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 562.92, 471.17 และ 439.50 mg kg^{-1} ตามลำดับ ดินชุดควบคุมมีการกระจายข้อมูลมากที่สุด การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากวิธีวิธีเอ็มอาร์ที (DMRT) พบว่า ดินทุกชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.01$) จากรูปที่ 15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Fe_{ext} ระหว่าง 0 ถึง 60 วันของดินแต่ละชุดได้แก่ ดินชุดควบคุม ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์และอาร์เซนเนต มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.01$) การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Fe_{ext} ระหว่างวันที่ 0 ถึง 60 เมื่อเปรียบเทียบแต่ละเวลาเพาะปลูก 0, 15, 30, 45, 60 วัน ระหว่างดินทั้ง 3 ชุด มีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มในวันที่ 15 ถึง 60 วันของการเพาะปลูกอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.01$) ดินชุดควบคุมมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณ Fe_{ext} เพิ่มขึ้นจากวันที่ 0 มีค่าสูงสุดในวันที่ 15 เท่ากับ 557.67 mg kg^{-1} จึงลดลงอย่างต่อเนื่องจากวันที่ 30 จนต่ำสุดในวันที่ 60 เท่ากับ 308.67 mg kg^{-1} ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์มีแนวโน้มคล้ายดินชุดควบคุมคือ ปริมาณ Fe_{ext} เพิ่มขึ้นสูงสุดจากวันที่ 0 ถึง 15 มีค่า 532.00 mg kg^{-1} แล้งจึงลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าต่ำสุดในวันที่ 60 ของการเพาะปลูกเท่ากับ 341.67 mg kg^{-1} ดินที่ใส่อาร์เซนเนตมีแนวโน้มคล้ายดินทั้ง 2 ชุดคือ ปริมาณ Fe_{ext} มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นค่าสูงสุดในวันที่ 15 มีค่า 638.67 mg kg^{-1} และลดลงเล็กน้อยในวันที่ 30 จากนั้นจึงลดลงอย่างมากในวันที่ 45 และ 60 ซึ่งวันที่ 60 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 480.67 mg kg^{-1}

การเคลื่อนย้ายและการละลายของสารหนูในสารละลายดินสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับการปรากฏและพฤติกรรมของเหล็กในดิน โดยสารหนูจะตกตะกอนร่วมกับเหล็กและไม่เคลื่อนย้าย โดยเกิดเป็นรูปที่ไม่ละลายคือ ไฮเดรตไอเอิร์นออกไซด์ (Hydrated Fe oxide) สารหนูและเหล็กละลายน้ำน้อยถูกพบเมื่อค่าศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันน้อยกว่า 50 mV โดยจุดนี้เหล็กและสารหนูจะถูกรีดิวซ์โดยเปลี่ยนเวเลนซ์จากประจุบวก 5 ไปเป็นประจุบวก 3 ความเข้มข้นสูงสุดที่สารหนูและเหล็กละลายได้คือ -50 และ -150 mV สารหนูจะละลายลดลงที่ -200 mV เพราะบทบาทของซัลไฟด์และอาร์เซนไนต์ โดยสารหนูสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์ เกิดสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ และไม่เกี่ยวข้องกับเหล็กอีก (Signes-Pastor et al., 2007) อิทธิพลของศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันต่อการละลายสารหนูในดินได้รับอิทธิพลจาก 1. การรีดักชันของอาร์เซนเนตไปเป็นอาร์เซนไนต์ โดยปฏิกิริยาการคาย 2. การละลายของไอเอิร์นออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (Fe-oxyhydroxides) และปลดปล่อยตะกอนร่วม (co-precipitated Arsenate) 3. การเข้ากันได้ของสารหนูและซัลเฟอร์ โดยการก่อตัวที่มีประสิทธิภาพของแร่ธาตุอาร์เซนไคซัลไฟด์ (As sulfide) ที่ไม่ละลาย (Signes-Pastor et al., 2007) เหล็กดูดซับอาร์เซนเนตมากกว่าฟอสฟอรัส (Violante and Pigna, 2002) ความเข้มข้นสารหนูในดินสัมพันธ์กับเหล็ก อะลูมิเนียม แมงกานีส แร่ดินเหนียว แร่ ออกซีแอนไอออน (Mineral oxyanions) และ สารอินทรีย์ในดิน (Goh and Lim, 2005) ปัจจัยพีเอชและศักย์ภาพการเกิดออกซิเดชัน-

รีดักชันส่งผลทำให้เกิดการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Fe-hydroxides) เช่น เกอไทต์ (Goethite) และเฟอร์ริคไฮไดรต์ (Ferrihydrite) ซึ่งพบได้ทั่วไปในดินมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการเคลื่อนย้ายสารหนู (Jain et al., 1999) การตกตะกอนของแร่เหล็กในเฟสแร่ ธาตุฟอสเฟตที่พื้นผิวประจุเป็นบวก ส่งผลให้การดูดซับสารหนูเพิ่มขึ้น ดังนั้นปฏิกิริยานี้จึงขึ้นกับพีเอชอย่างมากกับสารหนูที่มีประจุลบ (anionic) เช่น HAsO_4^{2-} และ HAsO_3^{2-} (Lombi et al., 2000) โดยจะดูดซับสูงกว่า เมื่อพีเอชอยู่ระหว่าง 4 – 7 โดยพีเอชที่เหมาะสมคือ 4 ภายใต้เงื่อนไขการเพิ่มโปรตอนของผิวแร่ส่งเสริมการดูดซับอาร์เซเนตที่ประจุเป็นลบ อาร์เซเนตก่อพันธะอย่างแข็งแรงกับแร่เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe(III)oxide) ภายใต้เงื่อนไขออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์ โดยเกิดการแข่งขันระหว่างอาร์เซเนตและฟอสเฟต ในสภาพรีดิวซ์หรือน้ำท่วมขังนำไปสู่การละลายของไฮดรอกไซด์ออกไซด์ (Fe oxides) ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยอาร์เซไนต์ อาร์เซเนต เฟอร์รัสอาร์เซเนต (Fe(II) Arsenate) ดูดซับเกิดขึ้นระหว่างพีเอช 7 – 10 โดยพีเอชเหมาะสมคือ 7 เงื่อนไขไร้อากาศน้ำท่วมทำให้เกิดการคายฟอสเฟตเข้ากันได้อย่างแข็งแรงกับพื้นผิวไฮดรอกไซด์ออกไซด์ (Fe hydroxides) มากกว่าสารหนูจึงแทนที่ในพื้นผิวเหล็กและคายสารหนูออกมา การดูดซับอาร์เซเนตเพิ่มขึ้นสวนทางกับการลดพีเอช โดยอาร์เซเนตดูดซับไฮดรอกไซด์ออกไซด์ (Fe oxides) มากกว่าอาร์เซไนต์ อาร์เซไนต์มีประจุเป็นกลางจึงเคลื่อนย้ายได้มากกว่าในช่วงพีเอชกว้างกว่า (Bose and Sharma, 2002)

จากรูปที่ 14 อะลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Al, Al_{ex}) เมื่อเรียงลำดับค่าเฉลี่ยพบว่า ดินที่ใส่อาร์เซไนต์ > ดินชุดควบคุม > ดินที่ใส่อาร์เซเนต โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0251, 0.0190 และ 0.0170 mg kg^{-1} ตามลำดับ โดยดินที่ใส่อาร์เซไนต์มีการกระจายข้อมูลมากที่สุด การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธีดีเอ็มอาร์ที (DMRT) พบว่า ดินทั้ง 3 ชุดไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\text{-value} = 0.493$) จากรูปที่ 16 Al_{ex} เป็นรูปที่พบน้อยในดินแต่เป็นรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Al_{ex} ระหว่าง 0 ถึง 60 วันของดินแต่ละชุดได้แก่ ดินชุดควบคุม ดินที่ใส่อาร์เซไนต์และอาร์เซเนต มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} <$

0.01) การเปลี่ยนแปลงปริมาณ Al_{ex} ระหว่างวันที่ 0 ถึง 60 เปรียบเทียบแต่ละเวลาเพาะปลูก 0, 15, 30, 45, 60 วัน ระหว่างดินทั้ง 3 ชุดพบว่า มีความแตกต่างระหว่างทั้ง 3 กลุ่มในวันที่ 15 ถึง 60 ของการเพาะปลูกอย่างมีนัยสำคัญ ($P\text{-value} < 0.01$) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณ Al_{ex} ของดินชุดควบคุม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากวันที่ 0 ถึง 30 มีค่าสูงสุดในวันที่ 30 เท่ากับ 0.028 mg kg^{-1} และลดลงอย่างต่อเนื่องในวันที่ 45 และ 60 ดินที่ใส่อาร์เซไนต์ ปริมาณ Al_{ex} เพิ่มขึ้นจากวันที่ 0 ถึง 30 มีค่าสูงสุดคือ 0.046 mg kg^{-1} แล้วจึงลดลงในวันที่ 45 และ 60 ดินใส่อาร์เซเนตปริมาณ Al_{ex} ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากวันที่ 0 ถึง 30 มีค่าสูงสุดคือ 0.038 mg kg^{-1} แล้วจึงลดลงในวันที่ 45 และ 60 ดินที่ใส่อาร์เซไนต์มีปริมาณ Al_{ex} มากกว่าดินที่ใส่อาร์เซเนต

การดูดซับมากที่สุดของอาร์เซเนตบนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์อสัณฐาน (Amorphous Al hydroxides) เกิดขึ้นเมื่อพีเอช 4 – 4.5 (Anderson et al., 1976) อะลูมิเนียมช่วยควบคุมการเคลื่อนที่ของสารหนูในดินและน้ำ โดยใช้เคลื่อนย้ายสารพิษในสิ่งแวดล้อม สารหนูในสภาพออกซิไดซ์ดูดซับอย่างแข็งแรงกับอะลูมิเนียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์และออกไซด์ [Al(oxyhydr)oxide] โดยขึ้นกับความแข็งแรงของไอออน (ionic strength) ซึ่งการคายสารหนูจะมีน้อยในสภาพพีเอชเป็นกลางถึงเป็นด่าง แต่จะมีการคายสารหนูมากในสภาพเป็นกรดอ่อน (Tingying and Jeffrey, 2018) อย่างไรก็ตามสารหนูไม่คงค้างอย่างแข็งแรงโดยแร่อะลูมินัส (Aluminous) แต่มีความเข้ากันได้สูงกับผิวแร่ต่างๆ ที่มีเหล็กโดยเฉพาะไฮดรอกไซด์ออกไซด์และออกไซด์ [Fe(hydr)oxides] พีเอชมีผลกระทบต่อการดูดซับอย่างแข็งแรงของสารหนูบนดิน และแร่ที่ประจุสามารถแปรผันได้ อาร์เซเนตถูกดูดซับมากกว่าบนไฮดรอกไซด์ออกไซด์ (Fe oxides) มากกว่าอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al oxides) ขณะที่อาร์เซไนต์ถูกดูดซับง่ายกว่า ธาตุฟอสเฟตสูง เพราะอาร์เซไนต์ก่อตัวเป็นกรดอ่อน จึงสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมที่เป็นด่าง นอกจากนี้ยังมีการแข่งขันการเข้ากันได้ระหว่างฟอสเฟตและอาร์เซเนต ซึ่งอาร์เซเนตเข้ากันได้น้อยกว่ากับอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al oxides) (Massimo et al., 2015) ดินเป็นกรดพีเอช < 5 เพิ่มการจัดหาสารหนูในดินและเพิ่มความเป็นพิษต่อ

พืช โดยเมื่อสารหนูก่อพันธะกับธาตุอื่นได้แก่ สารประกอบเหล็กและอะลูมิเนียมที่มีออกซิเจนจะละลายได้มากขึ้น อะลูมิเนียมมีความสามารถในการดูดซับสารหนูอย่างกว้างขวาง นิยมนำมาใช้บำบัดน้ำปนเปื้อนสารหนู การดูดซับสารหนูสัมพันธ์กับปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al oxides) โดยเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของไอออนนอกเหนือจากพีเอช ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน และไอออนเชิงซ้อน (complex ion) ในดินบนพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al oxides) และไอเอิร์นออกไซด์ (Fe oxides) โดยสารหนูถูกดึงดูดอย่างแรงจากประสิทธิภาพของแร่ออกไซด์ (oxidic minerals) ที่ปรากฏในดินเช่น กลุ่มอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al – OH group) ในแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) (Ghosh et al., 2003)

3.2 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สันและการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณของปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดสะสมสารหนูทั้งหมด (Total arsenic) ของกกอียิปต์

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สัน

Correlations	Total arsenic	day	speciation	pH	Eh	Fe	Ca	Mg	P	Al
Total arsenic	1									
day	0.331*	1								
speciation	0.713**	0.000	1							
pH	0.647**	0.548**	0.404**	1						
Eh	-0.601**	-0.710**	-0.105	-0.400**	1					
Extractable Fe	0.335*	-0.444**	0.330*	-0.102	-0.106	1				
Exchangeable Ca	-0.145	-0.123	-0.111	-0.255	0.034	0.233	1			
Exchangeable Mg	-0.447**	-0.567**	0.036	-0.318*	0.905**	-0.231	0.096	1		
Available P	0.214	0.263	0.034	0.199	-0.343*	-0.013	0.166	-0.184	1	
Exchangeable Al	0.353*	-0.069	-0.043	0.252	-0.369*	0.547**	0.054	-0.519**	0.078	1

หมายเหตุ: ** มีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 และ * มีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 1 การทดสอบสหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของกกอียิปต์ได้แก่ จำนวนวันที่เพาะปลูก ชนิดสารหนู พีเอช Fe_{ext} และ Al_{ex} มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญ โดยตัวแปรทั้ง 5 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (r) เท่ากับ 0.331*, 0.713**, 0.647**, 0.335* และ 0.353* (P-value < 0.01** และ 0.05*) ตามลำดับ ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันและ Mg_{ex} มีความสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (r) เท่ากับ -0.601** และ -0.447** (P-value < 0.01) แสดงในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาเกณฑ์ของ Stevens (1992) กล่าวว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระมีค่าน้อยกว่า 0.80 ซึ่งหมายถึง ตัวแปรไม่เกิดปัญหาความสัมพันธ์มีค่าสูงหรือไม่เป็นอิสระต่อกัน (multicollinearity) จึงนำมาพยากรณ์ที่ดีสามารถนำไปวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณต่อไป

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ (n = 36)

Variable	b	SE	β	t	P – value	VIF
(Constant)	-339.542	70.623		-4.808	0.000	
Arsenic speciation	20.249	2.724	0.498	7.434	0.000	1.338
Eh	-0.322	0.043	-0.626	-7.504	0.000	2.072
pH	52.681	11.314	0.369	4.656	0.000	1.870
Day	-0.987	0.298	-0.316	-3.313	0.002	2.702

หมายเหตุ: $R = 0.930$, $R^2 = 0.866$, $R^2 \text{ adj} = 0.852$, $f = 10.978$, $P\text{-value} = 0.002$, Durbin – Watson = 0.738

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ ตัวแปรเกณฑ์คือ ปริมาณสารหนูทั้งหมดที่กักอียิปต์ดูดสะสมไว้ ปัจจัยตัวแปรอิสระที่มีผลต่อการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดได้แก่ ชนิดของสารหนู พีเอช ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน และวันที่เพาะปลูก เมื่อตรวจสอบปัญหาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระมีค่าสูงหรือไม่เป็นอิสระต่อกัน (multicollinearity) จากข้อกำหนดค่า Variance inflation factor (VIF) ต้องมีค่าไม่เกิน 10 ที่แสดงว่า ตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กัน โดยจากการศึกษาพบว่า ค่า VIF มีค่าอยู่ระหว่าง 1.338 – 2.702 จึงไม่เกิดปัญหาดังกล่าวขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของกอกอียิปต์สามารถร่วมกันพยากรณ์ได้ร้อยละ 85.2 โดยมีค่า $R^2 \text{ adj}$ เท่ากับ 0.852 เมื่อนำตัวแปรพยากรณ์ทั้งหมดมาเขียนสมการได้ดังนี้ ค่าการสะสมสารหนูทั้งหมดของกอกอียิปต์ = $-339.542 + 20.249$ (ชนิดของสารหนู) – 0.322 (ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชัน) + 52.681 (พีเอช) – 0.987 (วันที่เพาะปลูก) จากสมการพบว่า อาร์เซไนต์และอาร์เซเนตมีแนวโน้มที่จะถูกสะสมอยู่ในดินมากกว่าถูกดูดสะสมโดยพืช พิจารณาจากค่าคงที่ของสมการ (constant value) เท่ากับ -339.542 ชนิดของสารหนูและพีเอชมีผลเชิงบวก กล่าวคือ อาร์เซเนตถูกดูดสะสมโดยกอกอียิปต์มากกว่าอาร์เซไนต์ และหากพีเอชเพิ่มขึ้นจะส่งเสริมการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของกอกอียิปต์ ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันมีผลเชิงลบต่อการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของกอกอียิปต์ หากลดลงจะส่งเสริมการดูดสะสม

สารหนูทั้งหมดของพืช วันที่เพาะปลูกที่มีการสะสมสูงสุดคือวันที่ 30 ของการเพาะปลูก แล้วจะลดลงเมื่อเวลาเพาะปลูกเพิ่มขึ้น จากสมการสามารถร่วมพยากรณ์ได้ร้อยละ 85.2 จึงมีความน่าเชื่อถือระดับดีคือ เกินกว่าร้อยละ 70 Stevens (1992)

4. สรุปผลการทดลอง

การบำบัดสารหนูในสภาพดินน้ำขังโดยกอกอียิปต์พบว่า กอกอียิปต์มีการสะสมสารหนูทั้งหมดได้มากโดยมีการสะสมอาร์เซเนตมากกว่าอาร์เซไนต์ และมีการสะสมสูงกว่า 100 mg kg^{-1} จึงเป็นพืชไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์ของสารหนู โดยมีการสะสมมากที่สุดในวันที่ 30 ของการเพาะปลูก พีเอชขณะทำการบำบัดมีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ความเป็นกลาง เนื่องจากเป็นสภาพดินน้ำขัง โดยพีเอชของดินที่อาร์เซไนต์และอาร์เซเนตสูงกว่าดินชุดควบคุม ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันมีการเปลี่ยนแปลงจากสภาพออกซิเดชันกลายเป็นรีดักชัน เนื่องจากสภาพดินน้ำขัง โดยศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันของดินที่ใส่อาร์เซเนตและอาร์เซไนต์มีสภาพรีดักชันต่ำกว่าดินชุดควบคุม P_{av} มีความใกล้เคียงกันในดินชุดควบคุมและชุดที่ใส่สารหนูโดยค่าเฉลี่ยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการหาในรูป P_{av} ซึ่งพืชนำไปใช้ในการเจริญเติบโตปริมาณ Ca_{ex} ในดินที่ใส่อาร์เซไนต์มีปริมาณลดลงมากที่สุด เนื่องจากแคลเซียมสามารถก่อพันธะกับอาร์เซไนต์ในทุกความเข้มข้นโดยทันที ดินที่ใส่อาร์เซไนต์จึงมีปริมาณแคลเซียมต่ำกว่าดินที่ใส่อาร์เซเนตสำหรับปริมาณ Mg_{ex} ในดินที่ใส่อาร์เซไนต์และอาร์เซเนตมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับดินชุดควบคุม โดย

ในดินทั้ง 3 ชุด มีปริมาณ Mg_{ex} ลดลงอย่างมากทุกชุดดิน ในวันที่ 15 ถึง 60 ของการเพาะปลูก โดยเมื่อเริ่มขังน้ำมีการลดลงมากที่สุดในวันที่ 15 ทุกชุดดินแล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Mg_{ex} เปลี่ยนไปอยู่ในรูปสารละลายในดินปริมาณ Fe_{ext} มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทุกชุดดิน โดยในวันที่ 15 มีการเพิ่มขึ้นมากที่สุด แล้วลดลงจนต่ำสุดในวันที่ 60 ในทุกชุดดิน การละลายของเหล็กและการทำปฏิกิริยากับสารหนูขึ้นกับพีเอชและศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันอย่างมาก จากการทดลองพบว่า Fe_{ext} ในดินที่ใส่อาร์เซนเดมากกว่าดินที่ใส่อาร์เซนไนต์ในทุกช่วงเวลาเพาะปลูก เมื่อพีเอชค่อยๆ เพิ่มขึ้นเข้าสู่ 7 เหล็กดูดซับอาร์เซนไนต์และอาร์เซนเดเพิ่มขึ้น ปริมาณเหล็กจึงลดลงเป็นรูปสารประกอบที่ไม่สามารถตรวจพบ เมื่อพีเอชสูง 7 – 10 อาร์เซนไนต์จะดูดซับได้ดีกว่า เมื่อศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันลดลง สารหนูและเหล็กจะละลายน้ำน้อยลงเกิดการตกตะกอนร่วมและไม่เคลื่อนย้าย โดยเกิดเป็นรูปที่ไม่ละลายคือ ไฮเดรตไอเอิร์นออกไซด์ (Hydrated Fe oxide) และปริมาณ Al_{ex} ไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทุกชุดดิน โดยแนวโน้มปริมาณ Al_{ex} มีการเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 30 แล้วค่อยๆ ลดต่ำลง ดินที่ใส่อาร์เซนไนต์มีปริมาณ Al_{ex} มากกว่าดินที่ใส่อาร์เซนเด Al_{ex} พบในปริมาณต่ำ เนื่องจากเป็น การตรวจวัดในรูป Al_{ex} ที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ปริมาณอะลูมิเนียมจะลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการตกตะกอนร่วมแบบไอโซมอร์ฟิก (isomorphic coprecipitation) กับแคลเซียม แมกนีเซียม และธาตุประจุบวกสอง อื่นๆ จากผลการทดสอบ สหสัมพันธ์เพียร์สันพบว่า จำนวนวันที่เพาะปลูก ชนิดสาร หนู พีเอช Fe_{ext} และ Al_{ex} มีสหสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของกกอียิปต์ แต่ ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันมีและ Mg_{ex} มีสหสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของกกอียิปต์ เมื่อพิจารณาารวมทุกปัจจัยโดยใช้ การถดถอยพหุคูณพบว่า สารหนูชนิดอาร์เซนเดกกอียิปต์ มีการสะสมมากกว่าอาร์เซนไนต์ และเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจะ ส่งเสริมการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของกกอียิปต์ ขณะที่ ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันหากลดลงจะ ส่งเสริมการดูดสะสมสารหนูทั้งหมดของกกอียิปต์ให้เพิ่ม ขึ้น โดยกกอียิปต์จะสะสมสูงสุดในวันที่ 30 เมื่อเวลาผ่านไป การสะสมจะลดลง จากผลการศึกษาในครั้งนี้ควรมีการ

ส่งเสริมให้น้ำพืชเหนือหน้า (emerged plant) เช่น กกอียิปต์ มาใช้ในการบำบัดสารหนูในพื้นที่ขังน้ำ เพราะมีความเหมาะสม เนื่องจากการสะสมสารหนูในปริมาณมากถือเป็นพืชไฮเปอร์แอคคิวมูเลเตอร์ อีกทั้งมีชีวมวลสูงทนทาน แพร่กระจายง่าย มีความสวยงาม เป็นแนวกั้นตามธรรมชาติ และควรมีแผนในการกำจัดในขั้นสุดท้ายอย่างเป็นระบบ เช่น การฝังกลบแบบปลอดภัย การค้นหาพืชน้ำ หลากหลายสายพันธุ์ที่มีความจำเป็นมาก นอกจากเป็นวิธี บำบัดที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังเป็นการศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อพืชในบริเวณที่ปนเปื้อน รวมทั้งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต สิ่งแวดล้อม และห่วงโซ่อาหารโดยรอบ การทราบถึงอันตรายและผลกระทบ จะนำมาสู่ความปลอดภัยและการเฝ้าระวังอย่างเหมาะสม ในอนาคตจะได้ทำการศึกษาพืชชนิดอื่นที่มีความสำคัญ และพบได้ในพื้นที่ขังน้ำของไทย เพื่อเป็นประโยชน์ในการ จัดการสิ่งแวดล้อมที่ปนเปื้อนสารหนูต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากหลักสูตร สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม (นานาชาติ) จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย และบัณฑิตวิทยาลัยแห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย โดยเป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ดุษฎี บัณฑิต และขอขอบคุณความอนุเคราะห์จากคณะ วิ ท ย า ศ า ส ต ร์ และ ค ณ ะ เก ช ต ร ศ า ส ต ร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้การสนับสนุนการสถานที่ สารเคมี อุปกรณ์ และสิ่งอำนวยความสะดวกทุกอย่าง เพื่อ ทำการทดลองจนสำเร็จด้วยดี และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่ายที่ ร่วมในงานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

- Abdul, R., John, R., & George, E. (2001). *Soil and plant laboratory manual*, 2nd ed., Islamabad, Pakistan: National Agricultural Research Center.
- Amita, J., Klaus, P. R., & Richard, H. L. (1999). Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite: Surface charge reduction and net OH⁻-release stoichiometry. *Environmental Science & Technology*, 33(8), 1179–1184. <https://doi.org/10.1021/es980722e>

- Anderson, M. A., Ferguson, J. F., & Gavis, J. (1976). Arsenate adsorption on amorphous aluminum hydroxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 54(3), 391–399. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(76\)90318-0](https://doi.org/10.1016/0021-9797(76)90318-0)
- American Water Work Association Water Environment Federation. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., New York, United states: American Public Health Association.
- Bissen, M., & Frimmel, F.H. (2003). Arsenic-A review. Part I: Occurrence, toxicity, speciation, mobility. *Acta hydrochim. Hydrobiol*, 31(1), 9–18. <https://doi.org/10.1002/ahch.200390025>
- Bolan, N., Mahimairaja, S., Kunhikrishnan, A., & Choppala, G. (2013). Phosphorus-arsenic interactions in variable-charge soils in relation to arsenic mobility and bioavailability. *Science of the Total Environment*, 463, 1154–1162. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.016>
- Bose, P., & Sharma, A. (2002). Role of iron in controlling speciation and mobilization of arsenic in subsurface environment. *Water Research*, 36, 4916–4926. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00203-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00203-8)
- Claes, B., Roger, H., Ingmar, P., & Maria, G. (2013). Plants influence on arsenic availability and speciation in the rhizosphere, roots and shoots of three different vegetables. *Environmental Pollution*, 184, 540–546. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.003>
- Deok, H. M., Dimitris, D., & Nektaria, M. (2004). Arsenic immobilization by calcium - arsenic precipitates in lime treated soils. *Science of the Total Environment*, 330, 171–185. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.03.016>
- Ekkasit, A., Pornsawan, V., Kasem, C., and Patana, A. (2002). *Selection of the emergent plants suitable for removal of arsenic from arsenic contaminated water* [Master's thesis]. Mahidol University. (in Thai)
- Emil, A. C., Tiberiu, F., Michaela, P., Ioan, M., Bela, A., & Cecilia, R. (2006). Distribution study of inorganic arsenic (III) and (V) species in soil and their mobility in the area of Baia-Mare, Romania. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 18(1), 11–25. <https://doi.org/10.3184/095422906782146294>
- Fuessle, R. W., & Taylor, M. A. (2004). Stabilization of arsenite wastes with prior oxidation. *Journal of Environmental Engineering*, 130(9), 1063–1066. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2004\)130:9\(1063\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2004)130:9(1063))
- Gambrell, R. P., & Patrick Jr, W. H. (1989). Cu, Zn, and Cd availability in a sludge-amended soil under controlled pH and redox potential conditions. In *Inorganic contaminants in the vadose zone (pp. 89–106)*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.10.1007/978-3-642-74451-8_7
- 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., & 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. <http://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/22705>
- Goh, K. H., & Lim, T. T. (2005). Arsenic fractionation in a fine soil fraction and influence of various anions on its mobility in the subsurface environment. *Applied geochemistry*, 20(2), 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.08.004>

- Islam, A., & Islam, W. (1973). Chemistry of submerged soils and growth and yield of rice. *Plant and soil*, 39, 555 – 565. <https://doi.10.1007/BF00264174>
- Jain, A., Raven, K. P., & Loeppert, R. H. (1999). Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite: surface charge reduction and net OH-release stoichiometry. *Environmental Science & Technology*, 33(8), 1179–1184. <https://doi.org/10.1021/es980722e>
- Jomjun, N., Siripen, T., Jintapat, N., Maliwan, S., Prasak, T., and Somporn, C. (2018). Potential of *Cyperus papyrus* (L.) for Inorganic Arsenic Accumulation in Cases of Arsenite and Arsenate in Submerged Soil. *Journal of Science Ladkrabang*, 27(1), 1–17. <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/JOSL/10990044.pdf>. (in Thai)
- Kubicki, J. D. (2005). Comparison of As(III) and As(V) complexation onto Al- and Fe-hydroxides. *Advances in Arsenic Research*, 915, 104–117. <https://doi.10.1021/bk-2005-0915.ch008>
- Lombi, E., Sletten, R. S. & Wenzel, W. W. (2000). Sequentially extracted arsenic from different size fractions of contaminated soils. *Water, Air, & Soil Pollution*, 124, 319–332. <https://doi.10.1023/A:1005230628958>
- Lu, Y., Dong, F., Deacon, C., Chen, H. j., Raab, A., & Meharg, A. A. (2010). Arsenic accumulation and phosphorus status in two rice (*Oryza sativa* L.) cultivars surveyed from fields in South China. *Environmental Pollution*, 158(5), 1536–1541. <https://doi.10.1016/j.envpol.2009.12.022>
- Mahajan, S., Pandey, G. K., & Tuteja, N. (2008). Calcium- and salt-stress signaling in plants: Shedding light on SOS pathway. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 471(2), 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.jabb.2008.01.010>
- Masscheleyn, P. H., Dlaune, R. D., & Patrick, J. R. (1991). Effect of redox potential and pH on arsenic speciation and solubility in a contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 25(8), 1414–1419. <https://doi.org/10.1021/es00020a008>
- Massimo, P., Antonio, G. C., Lucia, C., Alessia, S., & Violante, A. (2015). Arsenic in the Soil Environment: Mobility and Phytoavailability. *Environmental Engineering Science*. 32(7), 551–563. <https://doi.org/10.1089/ees.2015.0018>
- Nriagu, J. O., Bhattacharya, P., Mukherjee, A. B., Bundschuh, J., Zevenhoven, R., & Loeppert, R. H. (2007). Arsenic in soil and groundwater: an overview. *Trace Metals and other Contaminants in the Environment*, 9, 3–60. [https://doi.org/10.1016/S1875-1121\(06\)09001-8](https://doi.org/10.1016/S1875-1121(06)09001-8)
- Petrusevski, B., Sharma, S., Schippers, J. C., & Shordt, K. (2007). *Arsenic in Drinking Water, Thematic Overview*. Oxford, United Kingdom: IRC International Water and Sanitation Centre.
- Rahman, M. A., Hasegawa, H., Ueda, K., Maki, T., & Rahman, M. M. (2008). Arsenic uptake by aquatic macrophyte *Spirodela polyrhiza* L.: Interactions with phosphate and iron. *Journal of Hazardous Materials*, 160(2–3), 356–361. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.022>
- Ravenscroft, P., Brammer, H., & Richards, K. (2009). *Arsenic Pollution*, New Jersey, United States: John Wiley & Sons.
- Sanz, E., Munoz-Olivas, R., Camara, C., Sengupta, M. K., & Ahamed, S. (2007). Arsenic speciation in rice, straw, soil, hair and nails samples from the arsenic-affected areas of

- Middle and Lower Ganga plain. *Journal of Environmental Science and Health*, 42(12), 1695–1705. <https://doi.10.1080/10934520701564178>
- Senn, A. C., Hug, S. J., Kaegi, R., Hering, J. G., & Voegelin, A. (2018). Arsenate co-precipitation with Fe(II) oxidation products and retention or release during precipitate aging. *Water Research*, 131, 334–345. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.038>
- Signes-Pastor, A., Burló, F., Mitra, K., & Carbonell-Barrachina, A. A. (2007). Arsenic biogeochemistry as affected by phosphorus fertilizer addition, redox potential and pH in a west Bengal (India) soil. *Geoderma*, 137, 504–510. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.10.012>
- Shree, J. D. (2018). *Calcium (Ca): Forms, Sources and Behavior/Soil*. Retrieved March 10, 2023, from <http://www.soilmanagementindia.com>.
- Stevens, J. (1992). *Applied multivariate statistics for the social sciences*, 2nd ed., New Jersey, United States: Lawrence Erlbaum Associate, Inc.
- Szegedi, K., Vetterlein, D., & Jahn, R. (2010). Modelling rhizosphere transport in the presence of goethite, including competitive uptake of phosphate and arsenate. *Plant and Soil*, 330(1), 481–501. <https://doi.10.1007/s11104-009-0221-9>
- Tingying, X. & Jeffrey, G. C. (2018). Effects of Ionic Strength on Arsenate Adsorption at Aluminum Hydroxide–Water Interfaces. *Soil system*. 2(1), 1 – 13. <https://doi.org/10.3390/soils2010001>
- Thor, K. (2019). Calcium–Nutrient and messenger. *Frontiers in Plant Science*, 10, 440. <https://doi.10.3389/fpls.2019.00440>
- Violante, A., & Pigna, M. (200). Competitive sorption of arsenate and phosphate on different clay minerals and soils. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1788–1796. <https://doi.10.2136/sssaj2002.1788>
- Wei, L., Dehong, C., Fang, X., Jeannie, Z. Y. T., Pei-Pei, H., Wei-Guo, S., Natalita, M. N., & Rachel, A. C. (2016). Extremely high arsenic removal capacity for mesoporous aluminium magnesium oxide composites. *Environmental Science: Nano*, 3(1), 94–106. <https://doi.10.1039/C5EN00171D>
- Zeng, X., He, Q., Bai, L., Li, L., & Su, S. (2011). The arsenic speciation transformation in artificially arsenic-contaminated fluvo-aquic soil (Beijing, China). *Plant, Soil and Environment*, 57(3), 108–114. <https://doi.10.17221/198/2010-PSE>
- Zou, Q., Liu, F., & Yang, J. H. (2009). Adsorption-desorption and competitive adsorption of arsenic and phosphorus in purple soil. *Journal of Applied Ecology*, 20(6), 1383–1389. <http://www.cjae.net/EN/abstract/abstract2339.shtml>