

ผลของปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อลักษณะการดูดซับสังกะสี ในดินนาโซดิกพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้

Effect of Phosphorus Fertilizer on Zinc Sorption in Sodic Paddy Soils of Thung Kula Rong Hai

สายชล สุขญาณกิจ¹, สุภิมา ธนะจิตต์^{1*}, สมชัย อนุสนธิ์พรเพิ่ม¹
และ เอิบ เขียวรีนรมณ์¹

Saychol Sukyankij¹, Suphicha Thanachit^{1*}, Somchai Anusontpornperm¹
and Irb Kheoruenromne¹

บทคัดย่อ: ดินนาโซดิกที่ใช้ปลูกข้าวหอมมะลิพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ได้แก่ ชุดดินพินาย กุลาร้องไห้ ร้อยเอ็ด ท่าตูม และอุบล ถูกคัดเลือกเพื่อศึกษา 1) การดูดซับและการปลดปล่อยสังกะสีในดินที่ได้รับปุ๋ยฟอสฟอรัสแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 0.5, 1.0 และ 2.0 เท่าของอัตราแนะนำสำหรับข้าวหอมมะลิ (6 กก. P_2O_5 /ไร่) ภายใต้สภาพจำลอง การขังน้ำในห้องปฏิบัติการเป็นระยะเวลา 90 วัน และ 2) ผลของปุ๋ยฟอสฟอรัสที่มีต่อข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในโรงเรือนประกอบด้วยการไม่ใส่ปุ๋ย การใส่ฟอสฟอรัสในอัตราแนะนำและอัตราที่ทำให้เกิดการดูดซับสังกะสี ของดินต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่า การดูดซับสังกะสีของดินจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการขังน้ำและมีค่าสูงสุด ในวันที่ 14 ในชุดดินร้อยเอ็ด และชุดดินอุบล ส่วนชุดดินท่าตูมและชุดดินพินายเป็นวันที่ 30 จากนั้นจะเริ่ม ปลดปล่อยสังกะสีออกมาจนมีค่าสูงสุดภายใน 60 หลังขังน้ำและมีค่าลดลงอย่างชัดเจนภายใน 30 วันหลังจากที่ปลดปล่อยออกมาสูงสุด การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ของสังกะสีในดินในสภาพ น้ำขังโดยแปรปรวนในแต่ละดิน การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตรา 3 และ 6 กก. P_2O_5 /ไร่ จะทำให้ชุดดินพินายและ กุลาร้องไห้ดูดซับสังกะสีของดินลดลงและปลดปล่อยสังกะสีออกมาเพิ่มขึ้น ขณะที่การใส่ปุ๋ยในอัตราสูงที่ 12 กก. P_2O_5 /ไร่ จะทำให้ชุดดินที่เหลือดูดซับสังกะสีเพิ่มขึ้น การไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสทำให้น้ำหนักเมล็ดของข้าวใน ชุดดินอุบล และน้ำหนักแห้งต่อชั่งในชุดดินพินายต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การใส่ฟอสฟอรัสในอัตรา ที่ทำให้ดินดูดซับสังกะสีน้อยที่สุดหรือที่อัตราแนะนำมีผลให้องค์ประกอบผลผลิตของข้าวในดินทั้งสองเพิ่มขึ้น ไม่แตกต่างกัน และไม่พบการตอบสนองของข้าวทางด้านผลผลิตในดินที่เหลือ นอกจากนั้นการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส ทำให้ข้าวดูดใช้ฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีผลต่อการดูดใช้สังกะสียกเว้นในชุดดินพินายที่มีการดูดใช้สังกะสี เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

คำสำคัญ: การดูดซับและการปลดปล่อยสังกะสี, สังกะสีที่เป็นประโยชน์, ดินที่ได้รับอิทธิพลจากเกลือ, ข้าวขาวดอกมะลิ 105

Received March 29, 2019

Accepted July 18, 2019

¹ ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900

* Corresponding author: agrspc@ku.ac.th

ABSTRACT: Sodic paddy soils used for growing jasmine rice in Thung Kula Rong Hai, Phimai (Pm), Kula Rong Hai (Ki), Roi-Et (Re), Tha Tum (Tt) and Ubon (Ub) soil series, were selected for the study of 1) sorption and desorption of zinc (Zn) in the soil applied with different rates of phosphorus (P), 0, 0.5, 1.0 and 2.0 times of the recommended rate for jasmine rice ($6 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{rai}$) with the study undertaken under simulated waterlogged condition in laboratory for 90 days, and 2) effect of P fertilizer on Khao Kao Dok Mali 105 under greenhouse condition, comprising no P application, P applied at the recommended rate and at the rate with the lowest soil Zn sorption. Result showed that Zn sorption increased with increasing waterlogged period and had the highest value at day-14 in Re and Ub soil series and at day-30 in Tt and Pm soil series. After that Zn was continuously released until day-60 after waterlogging when the highest value was detected, and then the released amount clearly decreased within 30 days from the peaked release day. Phosphorus fertilization resulted in Zn availability under waterlogged condition but varied among soils. The application at the rates of 3 and $6 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{rai}$ induced a decrease of Zn sorption and an increase of Zn desorption in Pm and Ki soil series while applying at a high rate of $12 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{rai}$ increased Zn sorption in other soils. No P addition significantly gave the lowest weights of rice grain in Ub soil series and dry straw in Pm soil series whereas the application of P at the lowest Zn sorption and recommended rates stimulated a similar increase of rice components in both soils with no response of rice yield to P in other soils. In addition, P application also induced rice to take up more P but there was no effect on Zn uptake with the exception of Pm soil series that Zn uptake increased significantly.

Keywords: Zn-adsorption-desorption, available Zn, salt affected soils, Khao Dawk Mali 105 rice

บทนำ

สังกะสีเป็นหนึ่งในจุลธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญและพัฒนาของพืช เนื่องจากเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ไธโทโครม นิวคลีโอไทด์ ออกซิน และคลอโรฟิลล์ นอกจากนี้ยังเป็นตัวกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์หลายชนิดในพืช (Dobermann and Fairhurst, 2000) การขาดสังกะสีเป็นปัญหาหลักสำหรับการปลูกข้าวเนื่องจากสภาพการเพาะปลูกที่มีการขังน้ำเป็นเหตุให้ดินอยู่ในสภาพกรดที่รุนแรง ซึ่งสังกะสีสามารถทำปฏิกิริยากับกำมะถันในดินเกิดเป็นแร่สฟาลเอไรต์ซึ่งไม่ละลายน้ำ (Alloway, 2008) ประกอบกับพีเอชของดินจะเพิ่มขึ้นจนมีปฏิกิริยาดินใกล้เคียงเป็นกลางซึ่งทำให้สังกะสีเกิดการตกตะกอนอยู่ในรูป $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ซึ่งละลายน้ำได้ยาก (Vodyanitskit, 2010) ข้าวที่ได้รับสังกะสีไม่เพียงพอจะพบจุดสีน้ำตาลในใบช่วงระยะแตกกอ ชะงักการเจริญเติบโต ข้าวจะมีใบเล็กตายอดและข้อปล้องไม่ขยาย แคระแกร็น แตกกอน้อยส่งผลให้จำนวนช่อดอก นานักเมล็ด รวมทั้งคุณภาพของเมล็ดข้าวลดลงโดยเฉพาะทางด้านโภชนาการ (Dobermann and Fairhurst, 2000; Kaya and Higgs, 2002; Pandey et al., 2006; Cakmak, 2008)

พื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ของประเทศไทยถือเป็นแหล่งผลิตข้าวหอมมะลิที่สำคัญของประเทศและมีชื่อเสียงระดับโลก แต่ผลผลิตข้าวที่ได้นั้นแต่ละปีนั้นมีผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 380 กิโลกรัม/ไร่ เท่านั้น (ศูนย์สารสนเทศทางการเกษตร, 2557) อันเนื่องมาจากสาเหตุที่สำคัญหลายประการ และหนึ่งในนั้นคือลักษณะของดินในพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำเนื่องจากมีวัตถุต้นกำเนิดเป็นหินทรายและบางพื้นที่เป็นดินที่ได้รับอิทธิพลจากเกลือ (Duangpatra, 1998) จากการศึกษาของ ปัทมญา และคณะ (2560) ได้เก็บตัวอย่างดินในชุดดินพินาย กุลาร้องไห้ โคราซ อุบล และท่าตูมในพื้นที่จังหวัดร้อยเอ็ด สุรินทร์ ศรีสะเกษ และนครราชสีมา พบว่าดินมีอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับต่ำ ($2.4\text{--}7.0 \text{ g/kg}$) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำถึงต่ำมาก ($2.20\text{--}4.26 \text{ mg/kg}$) ขณะที่ปริมาณสังกะสีในรูปที่เป็นประโยชน์มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.16 mg/kg . (Inboonchuay et al., 2016) ซึ่งถือเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าวิกฤตของความต้องการสังกะสีในข้าว (Dobermann and Fairhurst, 2000) ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงเป็นสาเหตุให้เกษตรกรในพื้นที่จำเป็นต้องใช้ปุ๋ยในอัตราสูงโดยเฉพาะปุ๋ยเคมีธาตุอาหารหลักศูนย์วิจัยข้าวสุรินทร์ (2556) แนะนำการใส่ปุ๋ยเคมี

ตามค่าวิเคราะห์ดินที่เหมาะสมกับพื้นที่ในอัตรา 9-6-6 กก.N-P₂O₅-K₂O/ไร่ ซึ่งการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราต่างๆ นั้นถือว่ามีผลกระทบต่อระดับความเป็นประโยชน์ของจุลธาตุโดยเฉพาะสังกะสีในดิน (Agbenin, 1988; Mandal and Mandal, 1990; Zhao and Selim, 2010) Pérez-Novo et al. (2011) ศึกษาการดูดซับสังกะสีในดินกรดที่ได้รับอิทธิพลจากปุ๋ยฟอสเฟต พบว่าการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตในอัตราสูงจะลดความเป็นประโยชน์ของสังกะสีในดินลง เนื่องจากเกิดการรวมตัวของสังกะสีและฟอสฟอรัสเป็นแร่ไฮไพต์ (Zn₃(PO₄)₂·4H₂O) ขณะที่ Zhao and Selim (2010) ศึกษาการดูดซับและการปลดปล่อยสังกะสีในดินเมื่อได้รับอิทธิพลจากปุ๋ยฟอสเฟต พบว่าการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตจะลดอัตราการปลดปล่อยและเพิ่มอัตราการดูดซับสังกะสีของดิน เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นตัวการในการเพิ่มพื้นที่การดูดซับสังกะสีแบบจำเพาะของดิน ดังนั้นการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราที่แตกต่างกันในดินแต่ละพื้นที่จึงอาจมีผลต่อความเป็นประโยชน์รวมถึงลักษณะการดูดซับและการปลดปล่อยสังกะสีในดิน จึงเป็นที่มาของการทดลองนี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อลักษณะการดูดซับและการปลดปล่อยสังกะสีในดินนาในพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ของประเทศไทยที่ใช้ปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105

วิธีการศึกษา

ดินตัวแทนที่ใช้ในการศึกษาเป็นชุดดินที่ใช้ปลูกข้าวหอมมะลิอย่างแพร่หลายในพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้จำนวน 5 ชุดดิน ได้แก่ ชุดดินพิมาย (Pm) ที่ตำบลกุกาสิงห์ ชุดดินอุบล (Ub) ที่ตำบลเกษตรวิสัย อำเภอกเกษตรวิสัย จังหวัดร้อยเอ็ด ชุดดินกุลาร้องไห้ (Ki) ที่ตำบลศรีณรงค์ ชุดดินท่าตูม (Tt) ที่ตำบลกระเบื้อง อำเภอกชุมพลบุรี จังหวัดสุรินทร์ และชุดดินร้อยเอ็ด (Re) ที่ตำบลหนองแคน อำเภอราศีไศล จังหวัดศรีสะเกษ โดยในแต่ละชุดดินทำการเก็บตัวอย่างชั้นดินบน (ความลึก 30 ซม.) จากสมบัตินดินเบื้องต้น พบว่า ดินทุกบริเวณเป็นดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือจัดเป็นดินโซดิกเนื่องจากมีค่า SAR เกินกว่า 15 ขณะที่สมบัตินดินอื่นๆ แปรปรวนตั้งแต่มีเนื้อดินตั้งแต่ดินทรายร่วนจนถึงดินเหนียว ชุดดินพิมายและชุดดินร้อยเอ็ดมีความอุดมสมบูรณ์ปานกลางส่วนชุดดินกุลาร้องไห้

ท่าตูม และอุบลมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ แต่มีเพียงชุดดินร้อยเอ็ดที่มีปริมาณสังกะสีที่เป็นประโยชน์สูงกว่าค่าวิกฤตปริมาณสังกะสีที่เป็นประโยชน์ต่อข้าว (1.32 เปรียบเทียบกับ 0.8 มก./กก. (Dobermann and Fairhurst, 2000)) ขณะที่ชุดดินที่เหลือมีสังกะสีที่เป็นประโยชน์อยู่ในพิสัย 0.27-0.61 มก./กก. (Table 1)

การศึกษาประกอบด้วย 1) การศึกษาผลของปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อการดูดซับและการปลดปล่อยสังกะสีของดินโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์จำนวน 3 ซ้ำ ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราที่แตกต่างกันจำนวน 4 อัตราได้แก่ 0, 0.5, 1 และ 2 เท่าของอัตราแนะนำสำหรับข้าวหอมมะลิตามค่าวิเคราะห์ดินซึ่งมีค่าเท่ากับ 6 กก.P₂O₅/ไร่ (ศูนย์วิจัยข้าวสุรินทร์, 2556) ซึ่งตัวอย่างดินหนัก 3 กรัม ใส่ขวดแก้วขนาด 20 มล. เติมน้ำกลั่น 5 มล. เพื่อจำลองสภาพการขังน้ำ จากนั้นใส่ฟอสฟอรัสตามตำรับการทดลอง ปิดปากขวดด้วยพาราฟินและเจาะรูเพื่อระบายอากาศ ซึ่งน้ำที่อุณหภูมิตั้งเป็นเวลา 1, 7, 14, 30, 60 และ 90 วัน เมื่อครบกำหนดนำตัวอย่างดินไปวิเคราะห์การดูดซับและการปลดปล่อยสังกะสี ซึ่งดัดแปลงจากวิธีการของ Khaokaew (2010); Pérez-Novo et al. (2011) และ Hararah et al. (2012) โดยนำตัวอย่างดินที่บ่มภายในสภาพน้ำขังในห้องปฏิบัติการมาเติมสารละลาย 0.01 M CaCl₂ เป็น background solutions จำนวน 20 มล. ซึ่งมีความเข้มข้นของสังกะสีในรูปของ Zn(NO₃)₂ แตกต่างกันตั้งแต่ 0-300 มก./ลิตร หลังจากนั้นเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้สารละลายเข้าสู่ภาวะสมดุล เมื่อครบกำหนดนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกของแข็งออกจากสารละลาย นำตัวอย่างดินที่เหลือเติมสารละลาย 0.01 M CaCl₂ จำนวน 20 มล. เขย่าเป็นเวลา 2 ชม. จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงอีกครั้ง ของเหลวที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงทั้งสองนำไปวิเคราะห์ปริมาณสังกะสีด้วยเครื่อง Flame atomic spectrophotometer เพื่อคำนวณการดูดซับและการปลดปล่อยสังกะสีตามลำดับ และ 2) การศึกษาในโรงเรือนเพื่อศึกษาการตอบสนองของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ต่อปุ๋ยฟอสฟอรัสโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ จำนวน 4 ซ้ำ ประกอบด้วย การไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (P0) การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราที่ทำให้เกิดการดูดซับสังกะสีต่ำที่สุดของแต่ละดินที่ได้มาการศึกษาที่ 1 (P1) และ การใส่ปุ๋ยอัตรา 6 กก. P₂O₅/ไร่ (P2) ซึ่งเทียบเท่ากับอัตราแนะนำสำหรับการปลูกข้าว

หอมมะลิ ในทุกตำรับการทดลองจะมีการเติมธาตุอาหารอื่นๆ ในอัตราที่มากเกินพอแต่ไม่มีการใส่สังกะสี การปลูกข้าวใช้ดินแห้งหนัก 10 กก./กระถาง ใส่ น้ำกลั่น ตีดินให้แตกละเอียด ปักดำกล้าข้าวอายุ 14 วัน จำนวน 3 ต้น/กระถาง รักษาระดับน้ำให้สูง 5 ซม. จากผิวดิน

ตลอดระยะเวลาการทดลองโดยใช้น้ำกลั่น เก็บเกี่ยวข้าวที่อายุ 110 วัน พร้อมเก็บตัวอย่างพืชที่แบบแยกส่วน ได้แก่ เมล็ดข้าวขาว และตอซังข้าว (รวมแกลบ) เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสังกะสี

Table 1 Properties of soil used in the experiment

Properties	Pm	Ki	Re	Tt	Ub
Texture	C	SCL	SL	L	LS
Sand (g/kg)	153	655	531	478	859
Silt (g/kg)	248	267	156	168	61
Clay (g/kg)	599	78	313	354	80
pH ($1:1 \frac{\text{soil}}{\text{H}_2\text{O}}$)	3.94	4.96	4.17	4.45	4.49
ECe (dS m^{-1})	0.58	3.08	0.92	0.53	0.49
Organic matter (g/kg)	26.9	8.51	18.4	4.79	12.5
Available P (mg/kg)	25.0	8.07	57.0	9.85	6.40
Exchangeable K (mg/kg)	69.2	35.9	51.9	36.9	16.4
Cation exchange capacity ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	22.7	5.25	6.00	6.00	3.25
Sodium absorption ratio (SAR)	26.7	60.2	43.4	41.1	31.1
Exchangeable sodium percentage (ESP)	20.7	23.4	77.6	44.2	40.2
Extractable Zn-DTPA (mg/kg)	0.27	0.61	1.32	0.61	0.53
Extractable Fe-DTPA (mg/kg)	775	1,397	518	264	80
Extractable Cu-DTPA (mg/kg)	5.03	1.08	0.66	0.75	0.17
Extractable Mn-DTPA (mg/kg)	50.8	60.7	13.6	13.7	7.87

Remark: Pm=Phimai soil series, Ki=Kula Ronghai soil series, Re= Roi-et soil series, Tt= Tha Tum soil series and Ub= Ubon soil series; C= clay, SCL= sandy clay loam, SL= sandy loam, L= loam and LS= loamy sand

การวิเคราะห์ข้อมูล ประกอบด้วย การวิเคราะห์อัตราการดูดซับและการปลดปล่อยสังกะสีของดิน จะใช้สมการ Freundlich คือ $q_e = K_F C_e^{1/n}$ โดย q_e หมายถึงปริมาณการดูดซับหรือการปลดปล่อยสังกะสี ณ จุดสมดุล C_e หมายถึง ความเข้มข้นของสังกะสี ณ จุดสมดุลของการทดลอง (มก./กก.) K_F หมายถึง ค่าคงที่ด้านความจุของ Freundlich ในการดูดซับ n หมายถึงค่าคงที่ด้านความหนาแน่นของ Freundlich ในการดูดซับ (Freundlich, 1906) และ 2) วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติขององค์ประกอบผลผลิตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และปริมาณการดูดซับและปลดปล่อยสังกะสีของดินที่ได้รับปุ๋ยฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการศึกษาและวิจารณ์

ลักษณะการดูดซับและการปลดปล่อยสังกะสีของดินที่ศึกษา

จลนศาสตร์การดูดซับและการปลดปล่อยสังกะสีของดินที่ศึกษาภายใต้สภาพขังน้ำเป็นระยะเวลา 90 วัน พบว่า ชุดดินกุลาร้องให้ดูดซับสังกะสีได้สูงที่สุด (11.51-71.95 มก./กก.) รองลงมาได้แก่ ชุดดินพิมาย (19.03-44.77 มก./กก.) ชุดดินท่าตูม (2.14-12.77 มก./กก.) ส่วนชุดดินร้อยเอ็ดและอุบล ซึ่งเป็นดินที่มีเนื้อหยาบกว่าชุดดินอื่นๆ มีปริมาณการดูดซับสังกะสีอยู่ในพิสัยเดียวกันซึ่งมีค่าต่ำที่สุด (0.11-12.77 และ 0.01-10.08 มก./กก.) ซึ่งให้ผลไปในทิศทางตรงกันข้ามกับปริมาณการปลดปล่อยสังกะสี เนื่องจากปริมาณดินเหนียวมีผลอย่างมาก

ต่อการดูดซับธาตุอาหารพืชในกลุ่มของแคตไอออน โดย Huang et al. (2014) รายงานว่าอนุภาคขนาดดินเหนียวสามารถดูดซับสังกะสีได้สูงกว่าอนุภาคขนาดทรายและทรายแป้ง ด้วยเหตุนี้ดินในชุดดินพิมายและกุลาร้องไห้ซึ่งมีปริมาณดินเหนียวสูงกว่าจึงดูดซับสังกะสีได้มากกว่า ในทางตรงข้ามก็ให้ปลดปล่อยสังกะสีออกมาได้น้อยกว่า (0.57-11.59 และ 1.46-18.96 มก./กก.) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดดินท่าตูม (16.59-67.02

มก./กก.) ร้อยเอ็ด (19.07-101.2 มก./กก.) และอุบล (16.58-100.9 มก./กก.) (Figure 1)

เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาการขังน้ำ พบว่า การดูดซับสังกะสีของดินจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการขังน้ำและมีค่าสูงสุดในวันที่ 14 ยกเว้นในชุดดินท่าตูมและชุดดินพิมายที่เป็นวันที่ 30 จากนั้นปริมาณการดูดซับของสังกะสีของดินจะลดลงยกเว้นในชุดดินกุลาร้องไห้ที่มีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งในวันที่ 90 ซึ่งให้ผล

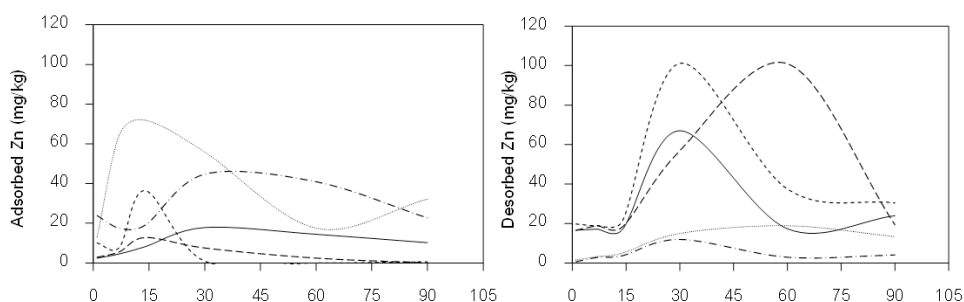


Figure 1 Zinc adsorption and desorption maximum capacity of the studied soils during flooding for 90 days.

สอดคล้องกับลักษณะการปลดปล่อยสังกะสีที่มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงแรกและมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจนมีค่าสูงสุดในวันที่ 30 สำหรับชุดดินร้อยเอ็ดท่าตูมและพิมาย และในวันที่ 60 สำหรับชุดดินอุบลและกุลาร้องไห้ จากนั้นจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจนภายใน 30 วันหลังจากที่ปลดปล่อยออกมาสูงสุด (Figure 1) แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกสังกะสีในดินถูกปลดปล่อยเนื่องจากพีเอชดินเกิดการเปลี่ยนแปลงอันเป็นผลมาจากการขังน้ำจึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทางเคมีของสังกะสี (Fomo et al., 1975; Khaokaew, 2010) แต่เมื่อระยะเวลาขังน้ำนานขึ้น สังกะสีที่ปลดปล่อยออกมาสามารถตกตะกอนร่วมกับกำมะถันในดินแล้วเปลี่ยนเป็นแร่สฟาสเลอไรต์ (Robson, 1993; Xiaing et al. 1995; Kabata-Pendias, 2004) ที่ละลายน้ำได้ยาก นอกจากนี้บางส่วนเกิดเป็นสังกะสีอินทรีย์ (Kashem and Singh, 2001) ซึ่งดินไม่สามารถดูดซับไว้ ปริมาณการดูดซับและการปลดปล่อยสังกะสีของดินจึงลดลงหลังจากขังน้ำต่อเนื่องนาน 60-90 วัน นอกจากนี้สังกะสีเหล่านี้ก็ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชเช่นกัน

ผลของปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อการดูดซับและการปลดปล่อยสังกะสีของดิน

การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราที่แตกต่างกันส่งผลให้การดูดซับฟอสฟอรัสของดินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยจะเริ่มส่งผลหลังจากการขังน้ำไปแล้ว 7 วัน ยกเว้นในชุดดินกุลาร้องไห้ที่ส่งผลหลังจากการใส่ปุ๋ยเพียง 1 วัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้แปรปรวนไปในแต่ละดิน (Figure 2) ปริมาณการดูดซับสังกะสีของดินเพิ่มขึ้นตามอัตราของปุ๋ยฟอสฟอรัสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในชุดดินร้อยเอ็ดและชุดดินท่าตูมยกเว้นในวันที่ 1 สำหรับชุดดินร้อยเอ็ด และวันที่ 1, 30 และ 90 วันหลังการขังน้ำสำหรับชุดดินท่าตูมที่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติโดยการใส่ปุ๋ยในอัตรา 12 กก. P_2O_5 /ไร่ ให้การดูดซับสังกะสีของดินสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 3.04-12.53 และ 8.92-11.19 มก./กก. เช่นเดียวกับในกรณีของชุดดินพิมายและกุลาร้องไห้ แต่อัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ทำให้การดูดซับฟอสฟอรัสสูงที่สุดมีค่าต่ำกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 3 และ 6 กก. P_2O_5 /ไร่ ตามลำดับ (Figure 2) ส่วนในกรณีของชุดดินอุบลกลับพบว่าการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสทำให้การดูดซับ

สังกะสีของดินลดลงซึ่งพบความแตกต่างทางสถิติเฉพาะในวันที่ 14 หลังการขังน้ำเท่านั้นโดยการใส่ปุ๋ยในอัตรา 3 กก. P_2O_5 /ไร่ ให้ปริมาณการดูดซับสังกะสีของดินต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 22.45 มก./กก. ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Saeed (1977) ซึ่งดำเนินการในดินเนื้อปูนที่มีคาร์บอนเนตสูงซึ่งไม่เหมือนกับชุดดินอุบลที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้

การปลดปล่อยสังกะสีของดินทั้งที่มีและไม่มี การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสจะเริ่มปลดปล่อยออกมาหลังจากการขังน้ำไปแล้ว 14 วัน และปริมาณการปลดปล่อยสังกะสีจะแตกต่างกันทางสถิติระหว่างดำรับการทดลองหลังจากการขังน้ำต่อเนื่องมากกว่า 60 วัน ยกเว้นในชุดดินร้อยเอ็ดและท่าตูมที่พบความแตกต่างทางสถิติตั้งแต่ในวันที่ 7 หลังการขังน้ำ การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเพิ่มปริมาณการปลดปล่อยสังกะสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยการใส่ในอัตรา 3 กก. P_2O_5 /ไร่ ให้ปริมาณการปลดปล่อยสังกะสีในชุดดินร้อยเอ็ดในวันที่ 7, 60 และ 90 หลังขังน้ำสูงที่สุด (20.16-41.48 มก./กก) และในชุดดินท่าตูมในวันที่ 14 และ 60 สูงที่สุด (23.75 และ 21.84 มก./กก) ส่วนการใส่ในอัตราสูงที่สุดที่ 12 กก. P_2O_5 /ไร่ ให้ปริมาณการปลดปล่อยสังกะสีในชุดดินพิมายในวันที่ 60 (6.52 มก./กก) และในชุดดินกุลาร้องไห้และชุดดินอุบลในวันที่ 90 สูงที่สุด (21.37 และ 45.81 มก./กก) อย่างไรก็ตามการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสทำให้การปลดปล่อยสังกะสีในบางช่วงของการขังน้ำในชุดดินกุลาร้องไห้ ร้อยเอ็ดและอุบลลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Figure 2)

ผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตรา 3-12 กก. P_2O_5 /ไร่ จะทำให้ปริมาณการดูดซับและการปลดปล่อยสังกะสีของ

ดินเพิ่มขึ้น โดยในชุดดินพิมายและกุลาร้องไห้ซึ่งเป็นดินที่มีการดูดซับสังกะสีสูงกว่าชุดดินที่เหลือ (Figure 1) พบว่า การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราต่ำจะทำให้ดินดูดซับสังกะสีเพิ่มขึ้น แต่การใส่ในอัตราสูง (สูงกว่า 3 และ 6 ในกรณีชุดดินพิมายและกุลาร้องไห้) จะทำให้การดูดซับสังกะสีของดินลดลงและเพิ่มปริมาณการปลดปล่อยสังกะสี เนื่องจากฟอสฟอรัสที่ละลายออกมาจากปุ๋ยส่วนใหญ่จะตกตะกอนกับสังกะสีในสารละลายดินเกิดเป็นสารประกอบในรูปแร่ไฮโดรซีต ($Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$) (Pérez-Novo et al., 2011) จึงทำให้ดินไม่สามารถดูดซับสังกะสีได้ การดูดซับสังกะสีของดินจึงลดลง ขณะที่สังกะสีจะถูกดูดซับอยู่ที่ผิวหน้าของของแข็งในดินเกิดการสร้างพันธะที่แข็งแรงกว่าพันธะอเล็กตรอนธรรมชาติ ดังนั้นสารประกอบฟอสฟอรัสที่เกิดขึ้นจึงอาจละลายออกมาได้ง่ายกว่าที่ถูกดูดซับอยู่ (Saeed, 1977) โดยเฉพาะในสภาพน้ำขัง (Zhao and Selim, 2010) สังกะสีจึงละลายออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มขึ้นในทางตรงกันข้ามในชุดดินร้อยเอ็ด และท่าตูมซึ่งเป็นดินที่มีการดูดซับสังกะสีต่ำกว่า (Figure 1) พบว่า การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสทำให้ความเป็นประโยชน์ของสังกะสีในดินลดลงโดยเฉพาะในอัตราสูงที่สุดที่ 12 กก. P_2O_5 /ไร่ เนื่องจากสังกะสีและฟอสฟอรัสมีปฏิสัมพันธ์เชิงลบกัน (Verma and Minhas, 1987) ซึ่งฟอสฟอรัสละลายออกมาเพิ่มขึ้นจึงทำให้มีฟอสฟอรัสเป็นจำนวนมากในการเพิ่มบริเวณที่มีการดูดซับสังกะสีแบบจำเพาะของดิน (Zhao and Selim, 2010) ในขณะที่การใส่ฟอสฟอรัสในอัตราต่ำที่ 3 กก. P_2O_5 /ไร่ อาจให้ฟอสฟอรัสออกมาไม่มากพอที่จะทำปฏิกิริยากับสังกะสีที่ละลายอยู่ในดิน จึงทำให้สังกะสีหลงเหลือในสารละลายดินและเป็นประโยชน์ต่อพืช

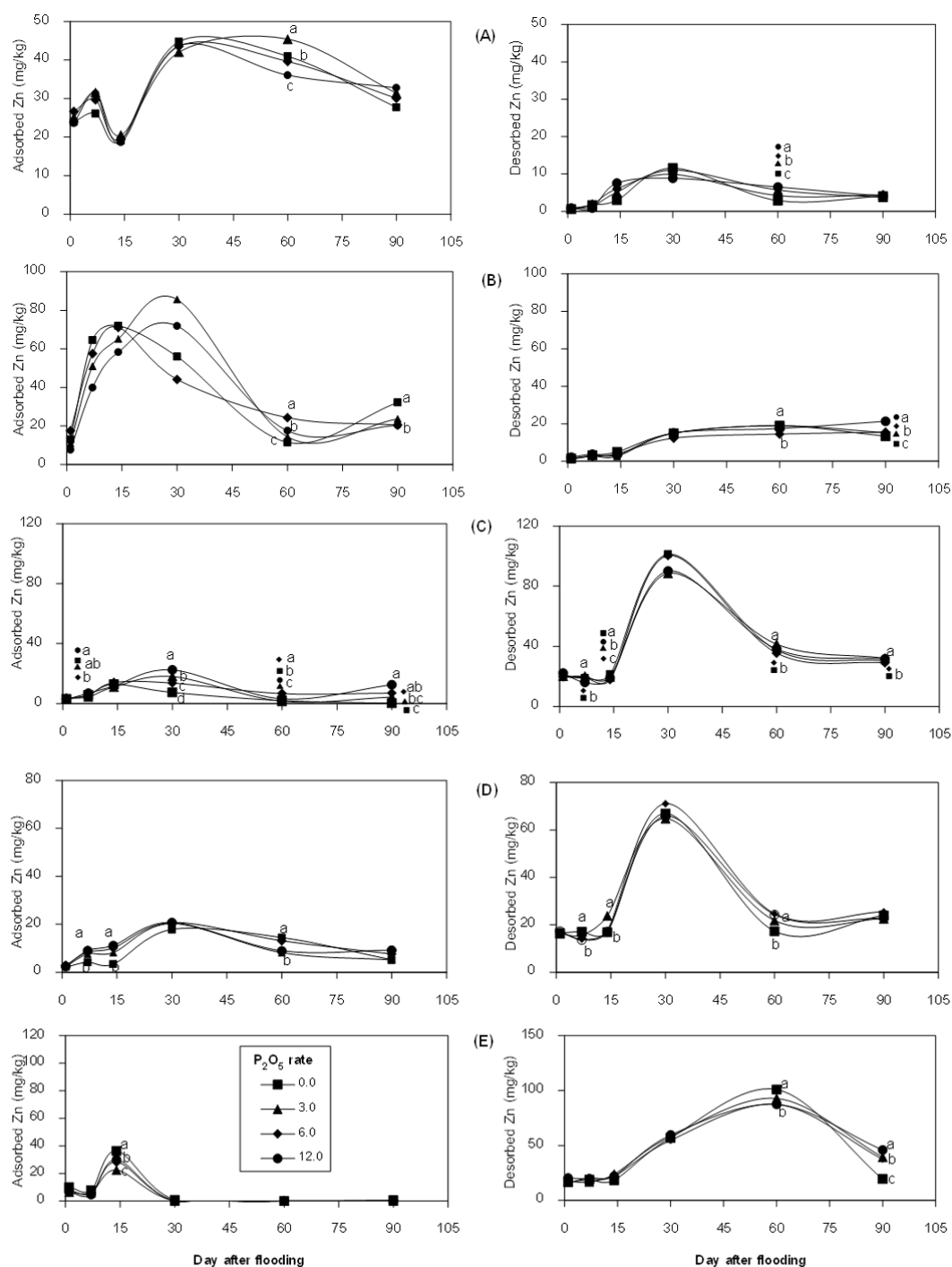


Figure 2 Zinc adsorption and desorption maximum capacity of the studied soils as affected by different rates of P fertilizer during flooding for 90 days: Pm soil series (A), Ki soil series (B), Re soil series (C), Tt soil series (D) and Ub soil series (E). The different lowercase letters at the same measured day are significantly different ($P \leq 0.05$).

ผลของปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อการตอบสนองของข้าวขาวดอกมะลิ 105

การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสมีผลต่อความเป็นประโยชน์ของสังกะสีในดินในสภาพน้ำขังชัดเจน แต่กลับส่งผลต่อข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในดินที่ศึกษาเหล่านี้ไม่ชัดเจนโดยมีเพียงน้ำหนักเมล็ดของข้าวที่ปลูกในชุดดินอุบล และน้ำหนักแห้งตอซังของข้าวที่ปลูกในชุดดินพิมายเท่านั้นที่พบความแตกต่างทางสถิติ การไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสให้น้ำหนักเมล็ดที่ความชื้นร้อยละ 14 และน้ำหนักแห้งตอซังต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 21.29 และ

56.48 ก./กระถาง แต่การใส่ฟอสฟอรัสในอัตราที่ทำให้ดินดูดซับสังกะสีน้อยที่สุดหรือที่อัตราแนะนำให้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นไม่แตกต่างกัน (Table 2) ส่วนในกรณีของชุดดินกุลาร้องไห้ ชุดดินร้อยเอ็ด และชุดดินท่าตูมไม่พบความแตกต่างทางสถิติ อย่างไรก็ตาม การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าวได้ดีกว่าการไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสโดยให้น้ำหนักเมล็ดและตอซังข้าวอยู่ในพิสัย 28.72-30.80, 35.29-39.20, 33.26-35.78 ก./กระถาง และ 37.35-41.13, 39.25-44.44, 51.81-53.25 ก./กระถาง ตามลำดับ (Table 2)

Table 2 A response of KDML 105 rice to P fertilizer rates

Trt ¹	Grain yield at 14% moisture (g/pot)					Dry straw wt. (g/pot)				
	Pm	Ki	Ub	Re	Tt	Pm	Ki	Ub	Re	Tt
P0	47.16	28.72	21.29b	35.29	33.26	56.48 b	37.35	29.65	39.25	55.27
P1	45.85	30.8	24.66ab	39.2	37.02	72.83 a	41.13	32.13	44.44	51.81
P2	48.89	27.41	26.70 a	39.2	35.78	68.53 a	37.63	34.05	42.79	53.25
F-test	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
CV (%)	14.01	7.92	4.89	8.44	6.65	7.61	7.3	4.69	10.47	4.52

¹ P0 = 0 P₂O₅/rai for all soil series; P1 = 3 P₂O₅/rai for Ub, Re and Tt soil series, 12 P₂O₅/rai for Pm and Ki soil series; P2 = 6 P₂O₅/rai (recommended rate) for all soil series.

การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสทำให้ข้าวดูดใช้ฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นจากการไม่ใส่ปุ๋ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นในชุดดินกุลาร้องไห้ที่ดูดใช้ฟอสฟอรัสต่ำกว่าในส่วนของเมล็ดข้าว และไม่พบความแตกต่างทางสถิติในกรณีของชุดดินร้อยเอ็ด และชุดดินท่าตูม (Table 3) นอกจากนี้การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสไม่มีผลต่อการดูดใช้สังกะสีของข้าวทั้งในส่วนตอซังและเมล็ดทางสถิติ (Table 3) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Alam et al., (2002) และ Zhu et al., (2001) ที่ทำการทดลองในข้าวสาลี ยกเว้นในชุดดินพิมายที่พบว่าการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสทำให้ตอซังข้าวดูดใช้สังกะสีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยการใส่ปุ๋ยในอัตราที่ทำให้ดินดูดซับสังกะสีน้อยที่สุดจะทำให้ตอซังข้าวดูดใช้สังกะสีสูงกว่าไม่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับ การใส่ปุ๋ยตามอัตราแนะนำ (Table 3) ซึ่งโดยทั่วไปปริมาณฟอสเฟตที่มีอยู่มากในดินจะยับยั้งการดูดใช้และการเคลื่อนย้ายสังกะสีในเซลล์พืช ดังแสดงในรายงานก่อนหน้า (Verma and Minhas,

1987; Marschner, 1993; Fan and Chen, 1997) เนื่องจากเป็นผลมาไฮโดรเจนไอออนจากเกลือของฟอสเฟต (Alloway, 2008) แต่ดินที่ใช้ศึกษาครั้งนี้เป็นกรดที่มีพีเอชอยู่ในพิสัย 3.94-4.96 (Table 1) ซึ่งในสภาพที่พีเอชดินต่ำกว่า 5.0 ฟอสฟอรัสจะไม่มีผลต่อความประโยชน์ของสังกะสีที่มีต่อพืช (Saleque et al., 2001) อย่างไรก็ตามผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าวในระดับหนึ่งซึ่งอาจเป็นผลมาจากข้าวได้รับฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Shahane et al. (2018) ที่พบว่าการใช้ฟอสฟอรัสและสังกะสีช่วยเพิ่มปริมาณชีวมวลในส่วนเหนือดินและผลผลิตขึ้นประมาณร้อยละ 25 หรืออาจเป็นผลจากการที่ฟอสฟอรัสส่งเสริมให้ดินดูดซับสังกะสีน้อยลง ดังแสดงในผลการศึกษาที่กล่าวมาแล้ว ทำให้สังกะสีเป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มขึ้นจึงส่งเสริมให้ข้าวดูดใช้และสะสมสังกะสีเพิ่มขึ้น

Table 3 Effect of P fertilizer rates on P and Zn uptake by plant part of KDML 105 rice

Trt ¹	Uptake by rice straw (g/plant)					Uptake by rice grain (mg/pot)				
	Pm	Ki	Ub	Re	Tt	Pm	Ki	Ub	Re	Tt
P (g/plant)										
P0	3.77b	2.28	4.13c	2.84	6.27	3.37	3.37 ab	2.25c	5.82	2.83
P1	4.69a	2.66	4.93b	4.08	6.02	3.70	3.67 a	3.18b	5.12	3.23
P2	4.73a	2.72	5.48a	3.66	6.47	3.64	2.92 b	5.78a	4.96	2.88
F-test	*	ns	*	ns	ns	ns	*	**	ns	ns
CV (%)	8	10	9	12	6	14	6	3	8	7
Zn (mg/plant)										
P0	0.19b	0.13	0.243	0.17	0.20	0.58	0.22	0.11	0.33	0.34
P1	0.27a	0.26	0.243	0.16	0.15	0.60	0.17	0.07	0.32	0.33
P2	0.23ab	0.18	0.340	0.16	0.18	0.61	0.21	0.11	0.47	0.36
F-test	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	13	27	22	16	18	19	21	23	21	16

¹ P0 = 0 P₂O₅/rai for all soil series; P1 = 3 P₂O₅/rai for Ub, Re and Tt soil series, 12 P₂O₅/rai for Pm and Ki soil series; P2 = 6 P₂O₅/rai (recommended rate) for all soil series.

สรุป

ดินชนิดที่ใช้ปลูกข้าวหอมมะลิในพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้มีความสามารถในการดูดซับและปลดปล่อยสังกะสีแตกต่างกันตามลักษณะของเนื้อดินโดยชุดดินกุลาร้องไห้ดูดซับสังกะสีได้สูงที่สุด รองลงมาได้แก่ชุดดินพินาย ชุดดินท่าตูม ส่วนชุดดินร้อยเอ็ดและอุบลดูดซับสังกะสีต่ำใกล้เคียงกันแต่ปลดปล่อยสังกะสีออกมาสูงสุด ขณะที่ชุดดินพินายจะปลดปล่อยสังกะสีออกมาได้น้อยสุด การปลูกข้าวในดินเหล่านี้ในสภาพน้ำขังทั้งที่มีการไถและไม่ไถปุ๋ยฟอสฟอรัส มีโอกาสที่ข้าวจะได้รับสังกะสีไม่เพียงพอโดยดินจะดูดซับสังกะสีสูงที่สุดหลังจากขังน้ำต่อเนื่องนาน 14-30 วัน จากนั้นจะเริ่มปลดปล่อยสังกะสีออกมาจนมีค่าสูงสุดภายใน 60 หลังขังน้ำ จากนั้นดินจะดูดซับและปลดปล่อยสังกะสีลดลงอย่างชัดเจนจนกระทั่งวันสุดท้ายของการขังน้ำ การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตรา 3-12 กก. P₂O₅/ไร่ มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของสังกะสีในดินในสภาพน้ำขังตลอดระยะเวลา 90 วัน แต่กลับพบการตอบสนองของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกไม่ชัดเจน โดยการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตรา 3 และ 6

กก. P₂O₅/ไร่ จะทำให้ชุดดินพินายและกุลาร้องไห้ดูดซับสังกะสีของดินลดลงและปลดปล่อยสังกะสีออกมามากขึ้น ขณะที่การใส่ปุ๋ยในอัตราสูงที่ 12 กก. P₂O₅/ไร่ จะทำให้ชุดดินที่เหลือดูดซับสังกะสีเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสยังส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าวทางด้านผลผลิตและการดูดใช้ฟอสฟอรัสและสังกะสีในระดับหนึ่งซึ่งอาจเป็นมาจากข้าวได้รับฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น หรืออาจเป็นผลจากการที่ฟอสฟอรัสส่งเสริมให้ดินดูดซับสังกะสีน้อยลงโดยเฉพาะในกรณีของชุดดินพินายและอุบล

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัย ตามแผนพัฒนาศักยภาพบัณฑิตวิจัยรุ่นใหม่ จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561 รวมทั้งได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยบางส่วนจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) (สวก)

เอกสารอ้างอิง

- ปัทมา สนิทมาโร ศุภิมา ธนะจิตต์ สมชัย อนุสนธิ
พรเพิ่ม และ เจริญวีรณมณ. 2560. สถานะ
ของกำมะถันในดินที่ใช้ปลูกข้าวหอมมะลิ และ
ผลของปุ๋ยกำมะถันที่มีต่อข้าวขาวดอกมะลิ
105. แก่นเกษตร 45: 35-46.
- ศูนย์วิจัยข้าวสุรินทร์. 2556. การจัดเขตศักยภาพการ
ผลิตข้าวจังหวัดร้อยเอ็ด. เอกสารวิชาการ กรม
การข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ.
- ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. 2557. ข้อมูลเอกภาพ
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. สำนักงานเศรษฐกิจ
การเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
กรุงเทพฯ.
- Agbenin, J.O. 1988. Phosphate induced retention
in tropical semi-arid soil. *European J. Soil
Sci.* 49: 693-700
- Alam, M.G.M., G. Allinson, F. Stagnitti, A. Tanaka
and M. Westbrooke. 2002. Metal
concentrations in rice and pulses of Samta
village, Bangladesh. *Bull. Environ. Contam.
Toxico.* 69: 323-329.
- Alloway, B.J. 2008. Zinc in soils and crop
nutrition, 2nd eds. International Zinc
Association Brussels, Belgium and
International Fertilizer Industry Association
Paris, France.
- Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains
with zinc: Agronomic or genetic
biofortification. *Plant Soil* 302: 1-17.
- Dobermann, A. and T. Fairhurst. 2000. Rice:
Nutrient disorders and nutrient
management. Potash and phosphate
institute (PPI), Phosphate institute of
Canada (PPIC) and International rice
research institute (IRRI).
- Duangpatra, P. 1998. Soil and climate
characterization of major cassava growing
area in Thailand. In: Howeler, R.H. and
Kawano, K., eds. Cassava breeding and
agronomy research in Asia. Proceedings
of regional workshop held in Rayong,
Thailand.
- Fan, D. and L.Q. Chen. 1997. Computer
simulation of grain growth using a
continuum field model. *Acta Mater* 45:
611-622.
- Forno, D.A., S. Yoshida and C.J. Asher. 1975.
Zinc deficiency in rice. I. Soil factors
associated with the deficiency. *Plant Soil*
42: 537-550.
- Freundlich, H.M.F. 1906. Over the adsorption
in solution. *J. Phys. Chem.* 57: 385 – 470.
- Hararah, M.A., F.L. Nasir, T.E. Hasan and
A.H.L. Muhtaseb. 2012. Zinc adsorption-
desorption isotherm: possible effects on
the calcareous vertisol soils from Jordan.
Environ. Earth Sci. 65: 2079-2085.
- Huang, B., Z. Li, J. Huang, L. Guo, X. Nie, Y. Wang,
Y. Zhang and G. Zeng. 2014. Adsorption
characteristics of Cu and Zn onto various
size fractions of aggregates from red
paddy soil. *J. Hazard. Materials* 264:176–
183

- Inboonchuay, T., A. Suddhiprakarn, I. Kheoruenromne, S. Anusontpornperm and R.J. Gilkes. 2016. Amounts and association of heavy metal in paddy soils of the Khorat basin, Thailand. *Geoderma Regional* 7: 120-131.
- Kabata-Pendias, A. 2004. Soil plant transfer to trace element an environment issue. *Geoderma* 122: 143-149.
- Kashem, M.A. and B.R. Singh. 2001. Metal availability in contaminated soils: I. Effect of flooding and organic matter on changes in Eh, pH and solubility of Cd, Ni and Zn. *Nutri. Cyc. Agroeco.* 61: 247-255.
- Kaya, C. and D. Higgs. 2002. Response of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) cultivar for foliar application of zinc when growth in sand culture at low zinc. *Scientia Hort.* 93: 53-64.
- Khaokaew, S. 2010. Speciation and release kinetic of cadmium and zinc in paddy soils. Ph.D. Dissertation. University of Delaware, USA.
- Mandal, B. and L.N. Mandal. 1990. Effect of phosphorus application on transformation of zinc fraction in soil and on the zinc nutrition of lowland rice. *Plant and Soil* 121: 115-123
- Marschner, H. 1993. Zn uptake from soil. In A.D. Robson ed. *Zinc in Soil and Plants*. Kluwer Academic Publishers. pp. 59-78.
- Pandey, M., N. Pandey, G.C. Pathak and C.P. Sharma. 2006. Zinc is critically required for pollen function and fertilization in lentil. *J. Trace Element Med. Biolo.* 20: 89-96.
- Perez-Novo, C., A. Bermúdez-Couso, E. López-Periago, D. Fernández-Calviño and M. Arias-Estévez. 2011. Zinc adsorption in acid soils, Influence of phosphate. *Geoderma* 162: 358 – 364.
- Robson, A.D. 1993. *Zinc in soil and plants*. Kluwer Academic Publisher.
- Saeed, M. 1977. Phosphate fertilization reduces zinc adsorption by calcareous soils. *Plant Soil* 48: 641-649.
- Saleque, M.A., M.J. Abedin, Z.U. Ahmed, M. Hasan and G.M. Panaullah. 2001. Influences of phosphorus efficiency on the uptake of nitrogen, potassium, calcium, manganese, sulfur and zinc in lowland rice varieties. *J. Plant Nutri.* 24: 1621-1623
- Shahane, A.A., Y.S. Shivay, D. Kumar and R. Prasanna. 2018. Interaction effect of nitrogen, phosphorus, and zinc fertilization on growth, yield, and nutrient contents of aromatic rice varieties, *J. Plant Nutri.* 41: 2344-2355.
- Verma, T.S. and R.S. Minhas. 1987. Zinc and phosphorus interaction in a wheat-maize cropping system. *Fertilizer Res.* 13: 78-86.
- Vodyanitskii, Y.N. 2010. Zinc forms in soils (review of publications). *Eurasian Soil Sci.* 43: 269-277.

- Xiang, H.F., H.A. Tang and Q.H. Ying. 1995. Transformation and distribution of forms of zinc in acid, neutral and calcareous soils of China. *Geoderma* 66: 121-135.
- Zhao, K. and H.M. Selim. 2010. Adsorption-desorption kinetics of Zn in soil: influence of phosphate. *Soil Sci.* 175: 145-153.
- Zhu, Y.G., S.E. Smith and F.A. Smith. 2001. Zinc (Zn)-phosphorus (P) interaction in two cultivars spring wheat (*Triticum aestivum* L.) differing in P uptake efficiency. *Annual Botany* 88: 941-945.