

อัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสมสำหรับข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่ปลูกในดินจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

Optimum Rate of Phosphorus Fertilizer for Pathum Thani 1 Rice Variety Grown in Soils of Phra Nakhon Si Ayutthaya Province

สายชล สุขญาณกิจ^{1*} โสภิดา สุขญาณกิจ¹ สิริวรรณ สมิตธิอาภรณ์¹ และ ธนวรรณ พานิชพัฒน์²
Saychol Sukyankij^{1*}, Sopida Sukyankij¹, Siriwan Samithiarporn¹ and Thanawan Panich-pat²

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา จ. พระนครศรีอยุธยา 13000

¹Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University,
Phranakhon Si Ayutthaya 13000, Thailand

²ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ. นครปฐม 73140

²Department of Science, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University,
Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand

*Corresponding author: Email: saychol.agri@gmail.com

(Received: 18 May 2022; Accepted: 8 September 2022)

Abstract: Phosphorus (P) fertilizer is an important macronutrient fertilizer for rice cultivation as it contributes to promote the growth, development of roots and inflorescences, which is directly affected on rice yield. This research was conducted to study the effects of P fertilizer application at the rate of 0, 0.04, 0.08 and 0.16 g P₂O₅ / pot on yield and P uptake. Besides, the appropriate P fertilizer application rate for Pathum Thani 1 rice grown in Tha Rua (Tr), Sena (Se) and Ayutthaya (Ay) soil series was assessed using the quadratic equation. The results showed that Pathum Thani 1 rice grown in the Tr and Se soil series tended to increase rice yields in accordance with the increasing P fertilizer rate. Meanwhile, Pathum Thani 1 rice grown in the Ay soil series found that the application of P fertilizer at the rate of 0.08 g P₂O₅ / pot gave the highest of yield (24.6 g / hill). As for the uptake of P in Pathum Thani 1 rice, it was found that the application of P fertilizer at the rate of 0.04 - 0.16 g P₂O₅ / pot resulted in having higher P uptake than without P fertilizer application treatment, especially in Se and Ay soil series. Evaluating the optimum P fertilizer application rate using quadratic equation was found that the optimal P fertilizer rates for Pathum Thani 1 rice grown in the Tr, Se and Ay soil series were 0.133, 0.127 and 0.102 g P₂O₅ / pot. The highest yields obtained from the application of fertilizers at the rates were 14.50, 29.38 and 24.79 g / hill, respectively.

Keywords: Phosphorus fertilizer, Pathum Thani 1 rice, Phra Nakhon Si Ayutthaya province, quadratic equation

บทคัดย่อ: ปุ๋ยฟอสฟอรัสเป็นปุ๋ยธาตุอาหารหลักที่สำคัญสำหรับการเพาะปลูกข้าว เนื่องจากมีส่วนช่วยในการส่งเสริมการเจริญเติบโต การพัฒนาของรากและช่อดอก ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อผลผลิตข้าว งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตรา 0, 0.04, 0.08 และ 0.16 ก. P_2O_5 / ไร่ ต่อผลผลิต การดูใช้ฟอสฟอรัส และทำการประเมินอัตราการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสมสำหรับข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในชุดดินท่าเรือ เสนา และอยุธยาโดยใช้สมการกำลังสอง (quadratic equation) ผลการทดลองพบว่า ข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในชุดดินท่าเรือและชุดดินเสนามีแนวโน้มให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่สูงขึ้น ขณะที่ข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในชุดดินอยุธยานั้นการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 0.08 ก. P_2O_5 / ไร่ ให้ผลผลิตสูงสุด (24.6 ก. / ไร่) ในส่วนของการดูใช้ฟอสฟอรัสในข้าวปทุมธานี 1 นั้น พบว่า การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 0.04 - 0.16 ก. P_2O_5 / ไร่ ส่งผลให้ข้าวปทุมธานี 1 มีปริมาณการดูใช้ฟอสฟอรัสสูงกว่าค่ารับทดลองที่ไม่ใส่ปุ๋ยอย่างชัดเจนโดยเฉพาะในชุดดินเสนาและชุดดินอยุธยา และเมื่อทำการประเมินอัตราการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสมโดยใช้สมการกำลังสองพบว่า อัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสมสำหรับข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในชุดดินท่าเรือ เสนา และอยุธยา มีค่าเท่ากับ 0.133, 0.127 และ 0.102 ก. P_2O_5 / ไร่ โดยให้ผลผลิตสูงสุดที่ได้จากการใส่ปุ๋ยในอัตราดังกล่าวเท่ากับ 14.50, 29.38 และ 24.79 ก. / ไร่ ตามลำดับ

คำสำคัญ: ปุ๋ยฟอสฟอรัส ข้าวปทุมธานี 1 จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สมการกำลังสอง

บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลักสำหรับการทำเกษตรในพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จากรายงานของ Sukyankij *et al.* (2019) ระบุว่า จังหวัดพระนครศรีอยุธยา มีพื้นที่ในการเพาะปลูกข้าวมากกว่า 948,000 ไร่ และสภาพภูมิประเทศมีความเหมาะสมในการเพาะปลูกข้าว เนื่องจากมีแม่น้ำไหลผ่านถึง 4 สาย ทำให้มีปริมาณน้ำเพียงพอสำหรับการเพาะปลูกทั้งข้าวนาปีและนาปรัง อีกทั้งดินในพื้นที่ส่วนใหญ่มีความอุดมสมบูรณ์สูงเนื่องจากมีวัตถุต้นกำเนิดเป็นตะกอนน้ำพา (Sukitprapanon *et al.*, 2016; Sukyankij *et al.*, 2017) การทำนาของเกษตรกรในพื้นที่ปัจจุบันนิยมทำนาปีละสองครั้ง พันธุ์ข้าวที่นิยมส่วนใหญ่เป็นสายพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูง เช่น พันธุ์ กข41 และ กข47 สายพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงและมีระยะเวลาเก็บเกี่ยวสั้น เช่น กข61 เป็นต้น พันธุ์ข้าวที่กล่าวมาข้างต้นมีจุดเด่นที่สามารถให้ผลผลิตสูงและหากมีระบบการจัดการที่ดีจะสามารถให้ผลผลิตได้มากกว่า 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ แต่มีข้อด้อยที่คุณภาพของข้าว เนื่องจากเป็นข้าวที่คุณภาพในการหุงสุกไม่ดี เนื้อสัมผัสแข็ง และไม่นุ่มลิ้นเวลารับประทานจึงทำให้ราคาขายต่ำเมื่อเทียบกับข้าวพันธุ์อื่น ๆ ที่คุณภาพในการรับประทานที่ดีกว่า

ข้าวปทุมธานี 1 หรือข้าวหอมปทุมเป็นพันธุ์ข้าวที่มีลักษณะคล้ายข้าวหอมมะลิ คุณภาพข้าวเมื่อหุงสุกดี นุ่มเหนียว มีกลิ่นหอมอ่อน (Rice Department, 2019a) โดยข้าวปทุมธานี 1 มีราคาขายสูงกว่าข้าวเปลือกเจ้าทั่วไปประมาณตันละ 2,500 บาท (Thai Rice Mills Association, 2022) และเป็นพันธุ์ข้าวที่เหมาะสมในการปลูกในเขตชลประทานภาคกลางของประเทศ ดังนั้นข้าวปทุมธานี 1 จึงเป็นพันธุ์ข้าวอีกหนึ่งสายพันธุ์ที่มีความเหมาะสมสำหรับปลูกในพื้นที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

การใส่ปุ๋ยถือเป็นปัจจัยการผลิตที่สำคัญอีกหนึ่งปัจจัย โดยส่วนใหญ่สูตรปุ๋ยที่นิยมใช้ในการปลูกข้าวในพื้นที่จะเน้นการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นสำคัญ ขณะที่การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมสำหรับการปลูกข้าวในพื้นที่นั้นไม่พบรายงานเป็นที่แพร่หลาย ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากลักษณะดินในพื้นที่ซึ่งมีวัตถุต้นกำเนิดเป็นตะกอนน้ำพาที่อุดมไปด้วยแร่หลายชนิดทั้งแร่ปฐมภูมิและแร่ทุติยภูมิที่ผุพังสลายตัวให้ธาตุโพแทสเซียม เช่น แร่ไมกา และแร่ดินเหนียวในกลุ่ม 2:1 เช่น แร่สเมกไทต์ เป็นต้น (Darunsontaya *et al.*, 2020; Dreher and Niederbudde, 1994) จึงเป็นเหตุให้ปริมาณโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ในดินพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาส่วนใหญ่อยู่ในระดับสูงถึง

สูงมาก (Sukyankij *et al.*, 2021b) และจากรายงานของ Sukyankij *et al.* (2021a) อัตราการใส่ปุ๋ยตามวิธีการของเกษตรกรในพื้นที่ดังกล่าวมีสูงถึง 19.5-10-0 กก. N-P₂O₅-K₂O/ไร่ ซึ่งถือว่าเป็นอัตราการใส่ปุ๋ยที่สูงเมื่อเทียบกับการใส่ปุ๋ยตามคำแนะนำในข้าวตามชนิดเนื้อดินของ Rice Department (2019b) ซึ่งแนะนำอัตราการใส่ปุ๋ยเคมีขั้นต่ำของข้าวที่ปลูกในดินเนื้อละเอียดไว้ที่ 8.6-5-0 กก. N-P₂O₅-K₂O/ไร่ ดังนั้นอัตราการใส่ปุ๋ยตามวิธีของเกษตรกรจึงถือว่าเป็นปริมาณที่สูงกว่าอัตราแนะนำอยู่มาก การลดปริมาณการใส่ปุ๋ยเคมีที่เกษตรกรใช้ในอัตราสูงนี้เป็นความท้าทายอย่างหนึ่งของการพัฒนาการเกษตรของประเทศ ทั้งนี้ มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลากหลายวิธีเพื่อใช้ในการประเมินอัตราการใส่ปุ๋ยที่เหมาะสม เช่น linear model, cubic model และ linear plus plateau model เป็นต้น (Michel and Makowski, 2013) และหนึ่งในวิธีที่มีการนำมาใช้ในการประเมินอัตราการใส่ปุ๋ยที่เหมาะสมในพืชคือ quadratic model (Cuong *et al.*, 2017; Jiang *et al.*, 2020; Michel and Makowski, 2013) ซึ่งเป็นการจำลองโดยอาศัยสมการพื้นฐาน (สมการกำลังสอง $y = ax^2 + bx + c$) และสามารถคำนวณได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปทั่วไป (Zhang *et al.*, 2018) จึงถือเป็นวิธีการประเมินอัตราการใส่ปุ๋ยที่มีความน่าสนใจวิธีหนึ่ง โดยงานทดลองนี้เป็นการศึกษาอัตราการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่มีความเหมาะสมสำหรับข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในดินจังหวัดพระนครศรีอยุธยาโดยอาศัยสมการกำลังสอง ในการประเมินอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสม อีกทั้งศึกษาอัตราการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันต่อผลผลิตและการดูดใช้ฟอสฟอรัสในข้าวปทุมธานี 1

อุปกรณ์และวิธีการ

การวางแผนการทดลอง

เก็บตัวอย่างดินซึ่งเป็นตัวแทนดินปลูกข้าวในพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาจำนวน 3 ชุดดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำ ปานกลาง และสูง ได้แก่ ชุดดินท่าเรือ (Tha Rua

soil series: Tr) ชุดดินเสนา (Sena soil series: Se) และชุดดินอยุธยา (Ayutthaya soil series: Ay) โดยอ้างอิงข้อมูลการเก็บตัวอย่างดินจากรายงานของ Sukyankij *et al.* (2021b) จำนวนชุดดินละ 500 กก. นำมาผึ่งลมให้แห้ง แบ่งตัวอย่างดินบางส่วนไปบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มม. แล้วนำตัวอย่างดินที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติดินชั้นพื้นฐาน ประกอบด้วย เนื้อดิน (Gee and Bauder, 1986) พีเอชของดิน (Thomas, 1996) ค่าการนำไฟฟ้าขณะดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Rhoades, 1996) ปริมาณอินทรียวัตถุ (Walkley and Black, 1934) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์โดยสกัดด้วยน้ำยา Bray II (Bray and Kurtz, 1945) และวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้โดยการพัฒนาสีด้วยกรดโมลิบโดฟอสฟอริกและใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นสารรีดิวซ์ (molybdophosphoric acid with ascorbic acid-reduced method) (Kuo, 1996) ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้โดยสกัดด้วยน้ำยา 1 M NH₄OAc pH 7 (Thomas, 1982) แล้ววิเคราะห์ปริมาณ โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (Westerman, 1990)

ในการปลูกข้าวเพื่อทดสอบนั้นใช้ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) ประกอบด้วยระดับการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับคือ 0 (T1), 0.04 (T2), 0.08 (T3) และ 0.16 (T4) ก. P₂O₅/กระถาง ซึ่งเทียบเท่าการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตรา 0, 2.5, 5 และ 10 กก. P₂O₅/ไร่ ใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปซูเปอร์ฟอสเฟต (0-20-0) ดังนั้น จึงเทียบเท่าการใส่ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟตในอัตรา 0, 0.2, 0.4 และ 0.8 ก./กระถาง ตามลำดับ แต่ละตำรับทดลองทำ 3 ซ้ำ ขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นด้วยการนำดินที่ผ่านการผึ่งจนแห้งแล้วหุบให้ละเอียด เตรียมกระถางพลาสติกปริมาตร 6.15 ลิตร จากนั้นชั่งดินใส่กระถาง ๆ ละ 5 กก. จากนั้นเติมน้ำแล้วกวนจนดินเหลวเป็นเนื้อแล้วเก็บเศษชิ้นส่วนพืชที่ติดมากับดินทิ้งให้หมดแล้วตั้งตัวอย่างดินทิ้งไว้ 7 วันจึงทำการปักดำกล้าข้าวปทุมธานี 1 ในการปักดำใช้กล้าข้าวปทุมธานี 1 อายุ 15 วัน ปักดำกระถางละ 2 ต้น รักษาระดับน้ำให้สูงประมาณ 5 ซม. จากผิวดิน

ตลอดระยะเวลาการทดลอง ในส่วนของการใส่ปุ๋ย ธาตุอาหารหลักอ้างอิงวิธีการใส่ตามรายงานของ Rice Department (2019b) เรื่องคำแนะนำการใช้ปุ๋ยเคมีและอัตราการใช้ปุ๋ยในข้าวไม่ไวต่อช่วงแสงตามชนิดเนื้อดิน โดยดินที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้จัดอยู่ในกลุ่มดินเนื้อละเอียด ซึ่งตามคำแนะนำนั้นใส่เฉพาะปุ๋ยไนโตรเจนและฟอสฟอรัส โดยปุ๋ยไนโตรเจนนั้นใช้ในรูปแบบของยูเรีย (46-0-0) ในอัตรา 8.6 กก./ไร่ หรือเท่ากับ 0.14 ก./ไร่/กระถาง แบ่งใส่สองครั้งที่ระยะ 7 วันหลังปักดำและระยะแตกกอสูงสุด (ประมาณ 70 วันหลังปักดำ) ในอัตราครั้งละ 0.07 ก./ไร่/กระถาง (Rice Department, 2019b) ส่วนปุ๋ยฟอสฟอรัสนั้นใส่เพียงครั้งเดียวที่ระยะ 7 วันหลังปักดำในอัตราตามแผนการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในส่วนของการเก็บข้อมูลนั้น ทำการเก็บเกี่ยวข้าวที่ระยะ 112 วันหลังปักดำ ข้อมูลที่เก็บประกอบด้วย ผลผลิตข้าวในส่วนเมล็ดและตอซัง ปริมาณการดูดใช้ฟอสฟอรัสในส่วนเมล็ดตอซัง และผลรวมการดูดใช้ฟอสฟอรัสในข้าวทั้งสองส่วน

การวิเคราะห์ทางเคมี

วิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในรูปแบบของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total P) ทั้งในส่วนเมล็ดและตอซังโดยย่อยสลายตัวอย่างพืชด้วยกรดผสมสองชนิด (acid mixture: HNO_3 - HClO_4 ในอัตราส่วน 2:1 v/v.) (Attanandana and Chanchareonsook, 1999) สารละลายที่ได้จากการย่อยสลายนำไปกรองโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 5 จากนั้น นำสารละลายใส่ที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดโดยพัฒนาสีด้วยกรดวานาโดมอลิบดีคฟอสฟอริก (vanadomolybdophosphoric acid method) และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตรด้วยเครื่อง spectrophotometer (Kuo, 1996) แล้วคำนวณค่าการดูดสะสมฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อพืชแต่ละส่วน โดยนำค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสคูณกับน้ำหนักแห้งพืช (Akinrinde and Gaizer, 2006)

การประเมินอัตราการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส

การประเมินอัตราการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเพื่อให้ได้ผลผลิตสูงสุดนั้น ทำการประเมินโดยใช้สมการกำลังสอง (quadratic equation) มีรูปของสมการคือ $y = ax^2 + bx + c$ โดยหาจุดตัดแกน x (ปริมาณปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสม) ที่มีผลให้ได้ค่าผลผลิตสูงสุด (แกน y) จากสูตร $x = -b/2a$ แล้วแทนค่า x ที่ได้ในสมการที่กล่าวมาข้างต้นเพื่อคำนวณค่าผลผลิตสูงสุดที่เกิดจากการใช้ปุ๋ยในอัตราที่เหมาะสม (Coungh *et al.*, 2017; Jiang *et al.*, 2020)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนโดยวิธี ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ผลการศึกษาและวิจารณ์

สมบัติดินที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติดินก่อนทำการทดลองแสดงใน Table 1 ชุดดินท่าเรือ ชุดดินเสนา และชุดดินอยุธยา จำแนกตามระบบอนุกรมวิธานดิน (soil taxonomy) ได้เป็น Vertic (Aeric) Endoaquepts, Sulfic Endoaquepts และ Vertic Endoaquepts ตามลำดับ (Division of Soil Survey and Soil Resource Research, 2019) ลักษณะเนื้อดินเป็นดินเหนียวและดินเหนียวปนทรายแป้ง ปฏิกริยาดินเป็นกรดรุนแรงถึงกรดเล็กน้อย (pH 4.8 - 6.5) ไม่เป็นดินเค็ม (EC_e 0.6 - 1.4 เดซิซีเมนส์/เมตร) ปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับปานกลางถึงสูงมาก (15.4 - 52.3 ก./กก.) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำถึงสูง (3.9-26.9 มก./กก.) และปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ในระดับสูงถึงสูงมาก (94-234, 2418-5031 และ 385-698 มก./กก. ตามลำดับ) (FAO Project Staff and Land Classification Division, 1973)

Table 1. Soil chemical properties prior to conducting the experiment

Soil series	Soil texture	Soil pH (1:1 H ₂ O)	EC _e (dS/m)	OM (g/kg)	Avail. P (mg/kg)	Exch. K (mg/kg)	Exch. Ca (mg/kg)	Exch. Mg (mg/kg)
Tr	Silty clay	6.5 (SA) ¹	0.6 (VL)	15.4 (M)	3.9 (L)	94 (H)	5031 (VH)	385 (H)
Se	Clay	4.8 (VSA)	1.2 (VL)	50.2 (VH)	13.7 (M)	157 (VH)	2418 (H)	443 (H)
Ay	Clay	6.1 (SA)	1.4 (VL)	52.3 (VH)	26.9 (H)	234 (VH)	4340 (VH)	698 (H)

¹ The letters in bracket are interpreted according to FAO Project Staff and Land Classification Division (1973): SA= strongly acid; VSA= very strongly acid; VL= very low; L= low; M= medium; H= high; VH= very high

ผลผลิตข้าว

น้ำหนักเมล็ดและตอซังข้าวปทุมธานี 1 แสดงใน Table 2 การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 0-0.16 ก. P₂O₅/กระถาง ไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งตอซัง โดยไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างตำรับทดลอง ($P > 0.05$) ค่าพิสัยของน้ำหนักแห้งตอซังข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในชุดดินท่าเรือ เสนา และอยุธยา มีค่าระหว่าง 35.2-44.8, 56.3-68.3 และ 76.4-86.8 ก./กอ ตามลำดับ ขณะที่น้ำหนักผลผลิตเมล็ดที่ความชื้น 14 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีความแตกต่างทางสถิติระหว่างตำรับทดลอง ($P < 0.05$) ในชุดดินเสนาและอยุธยาการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 0.04-0.16 ก./กระถาง ให้ผลผลิตเมล็ดไม่แตกต่างกันทางสถิติ (24.4-28.7 และ 20.5-24.6 ก./กระถาง ตามลำดับ) ขณะที่ชุดดินท่าเรือ การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 0.08-0.16 ก./กระถาง ให้ผลผลิตเมล็ดไม่แตกต่างกันเช่นกัน (13.8 และ 14.2 ก./กระถางตามลำดับ) ส่วนตำรับทดลองที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสให้ผลผลิตเมล็ดต่ำที่สุดในทั้งสามชุดดิน

การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสส่งผลให้ผลผลิตเมล็ดข้าวปทุมธานี 1 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกชุดดิน ยกเว้นในชุดดินเสนาที่พบว่า การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราต่ำ (0.04 ก./กระถาง) ไม่ทำให้ผลผลิตเมล็ดข้าวปทุมธานี 1 แตกต่างจากตำรับทดลองที่ไม่ใส่ปุ๋ย อย่างไรก็ตามการใส่ปุ๋ยในอัตรา 0.04 ก./กระถาง มีแนวโน้มทำให้ผลผลิตเมล็ดข้าวเพิ่มสูงขึ้นและการเพิ่มขึ้นของผลผลิตแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในกรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราที่สูงกว่า 0.04

ก./กระถาง เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับทดลองที่ไม่ใส่ปุ๋ย (Table 2) เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตและส่งผลถึงผลผลิตของพืช จากรายงานของ Dobermann and Fairhurst (2000) ระบุว่าฟอสฟอรัสมีความสำคัญต่อการเจริญของพืชโดยเฉพาะช่วงแรกของการเจริญเติบโต ในข้าวนั้นฟอสฟอรัสมีผลโดยตรงต่อการแตกกอ การแผ่ขยายขนาดของราก การพัฒนาของดอก โดยการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสนั้นแนะนำในช่วงที่ข้าวมีระบบรากที่ยังพัฒนาไม่สมบูรณ์เต็มที่รวมทั้งดินที่ปลูกมีระดับฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำ (Dobermann and Fairhurst, 2000) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในชุดดินทั้งสามชุดดิน (Table 2) มีการตอบสนองต่อการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ใส่ในอัตรา 0.04 - 0.16 ก. P₂O₅/กระถาง เป็นอย่างดี ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจาก 1) ในกรณีของข้าวที่ปลูกในชุดดินท่าเรื่อนั้นสังเกตได้ว่าในชุดดินดังกล่าวมีระดับของแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ในระดับสูงมาก (Table 1) ซึ่งแคลเซียมไอออนในสารละลายดินเหล่านี้มีโอกาที่ทำปฏิกิริยากับไอออนของฟอสฟอรัสในสารละลายดินและเปลี่ยนเป็นสารประกอบ Ca-P ซึ่งมีผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์มีปริมาณลดลง (Dobermann and Fairhurst, 2000; Fageria, 2001) ประกอบกับระดับของฟอสฟอรัสในดินดังกล่าวอยู่ในระดับต่ำอยู่แล้วยังมีผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่พืชดูดกินได้น้อยลงไปอีก 2) ในกรณีของข้าวที่ปลูกในชุดดินเสนาและอยุธยา ชุดดินนี้มีลักษณะเด่นคือเป็นดินในกลุ่มดิน

Table 2. Effects of different rates of phosphorus fertilizer on straw and grain yield in Pathum Thani 1 rice

Rates of P_2O_5 (g/pot)	Soil series					
	Dry straw weight (g/hill) ¹			Grain yield at 14% moisture (g/hill) ¹		
	Tr	Se	Ay	Tr	Se	Ay
0	38.6	56.4	77.0	8.8 ^c	17.5 ^b	14.5 ^c
0.04	35.2	56.3	86.8	11.4 ^b	24.4 ^{ab}	20.5 ^{ab}
0.08	42.9	61.3	76.4	13.8 ^a	27.4 ^a	24.6 ^a
0.16	44.8	68.3	79.1	14.2 ^a	28.7 ^a	21.4 ^a
F-test	ns	ns	ns	*	*	*
CV (%)	20.4	10.2	10.2	14.7	12.0	11.5

¹ Means within the same column followed by the same letters indicate no significantly different among treatments using DMRT; * significant difference at 0.05 probability levels, ^{ns} not significant

กรดกำมะถัน (Attanandana and Vacharotayan, 1986) ซึ่งสามารถตรึงฟอสฟอรัสได้สูง เนื่องจากดินมีปฏิกิริยาเป็นกรดซึ่งส่งผลให้เหล็กและอะลูมิเนียมละลายออกมา และเข้าจับกับไอออนของฟอสฟอรัส (Attanandana, 1993; Ch'ng *et al.*, 2014; Pierzynski *et al.*, 2005) จึงทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ในสารละลายดินมีปริมาณลดลง ดังนั้นเมื่อมีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสลงไปพืชจึงมีการตอบสนองต่อปุ๋ยที่ใส่เป็นอย่างดี

การดูดใช้ฟอสฟอรัสของข้าว

ปริมาณการดูดใช้ฟอสฟอรัสในข้าวปทุมธานี 1 ที่ได้รับปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราที่แตกต่างกันแสดงใน Table 3 จากผลการทดลองพบว่า การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 0 - 0.16 ก. P_2O_5 /กระถาง มีผลให้ปริมาณการดูดใช้ฟอสฟอรัสในตอซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$) ยกเว้นการดูดใช้ฟอสฟอรัสในตอซึ่งข้าวที่ปลูกในชุดดินท่าเรือ ($P > 0.05$) ในส่วนของการดูดใช้ฟอสฟอรัสในเมล็ดพบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.01$) ในทั้งสามชุดดิน และในส่วนของปริมาณการดูดใช้ฟอสฟอรัสทั้งหมดนั้น ในชุดดินเสนาและอยุธยาพบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งระหว่างดำรับทดลอง ($P < 0.01$) ส่วนใน

ชุดดินท่าเรือพบว่า การให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราที่แตกต่างกันมีผลให้การดูดใช้ฟอสฟอรัสทั้งหมดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราที่สูงขึ้นมีผลให้การดูดใช้ฟอสฟอรัสรวมของข้าวปทุมธานี 1 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน (Table 3) โดยเฉพาะในชุดดินเสนา โดย การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 0.16 ก. P_2O_5 /กระถาง ให้ปริมาณการดูดใช้ฟอสฟอรัสรวมในข้าวปทุมธานี 1 สูงที่สุด (0.69 ก./กอ) และที่อัตราการใส่ปุ๋ยเดียวกันนี้ ให้ปริมาณการดูดใช้ฟอสฟอรัสรวมในข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในชุดดินท่าเรือสูงที่สุดเช่นกัน (0.42 ก./กอ) ขณะที่ในชุดดินอยุธยานั้นพบว่า การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 0.04 - 0.16 ก. P_2O_5 /กระถาง ให้ปริมาณการดูดใช้ฟอสฟอรัสรวมในข้าวปทุมธานี 1 ไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าพิสัยระหว่าง 0.54 - 0.60 ก./กอ

เมื่อพิจารณาการดูดใช้ฟอสฟอรัสในข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในดินทั้งสามชุดดินจะเห็นได้ว่าการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 0.04 - 0.16 ก. P_2O_5 /กระถาง ส่งผลให้ข้าวมีการดูดใช้ฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับดำรับทดลองที่ไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส และเมื่อพิจารณาข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในชุดดินเสนาและอยุธยา พบว่าค่าการดูดใช้ฟอสฟอรัสรวม (total P uptake) สูงสุดที่ได้จากการทดลอง (0.69 และ 0.60 ก./กอ) มีค่าสูงกว่า

ตำรับที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0.35 และ 0.35 ก./กอ สำหรับชุดดินเสนาและอยุธยา ตามลำดับ) ประมาณ 2 เท่า (Table 3) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากปริมาณการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นรวมทั้งปัจจัยทางดินที่มีส่วนในการส่งเสริมความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินให้มีค่าสูงขึ้นในระหว่างการปลูกข้าว กล่าวคือ จากผลการวิเคราะห์ดินเบื้องต้นพบว่า ทั้งชุดดินเสนาและชุดดินอยุธยามีอินทรียวัตถุอยู่ในระดับสูงมาก โดยอินทรียวัตถุในดินถือเป็นแหล่งสำรองธาตุอาหารพืชที่สำคัญ นอกจากนี้ยังมีบทบาทต่อสมบัติทางกายภาพและชีวภาพของดิน (Mala, 2007) ดังนั้น ดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุสูงจึงมีโอกาสดูดซับธาตุอาหารให้กับพืชได้สูงตามไปด้วย ซึ่งอาจเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ข้าวที่ปลูกในชุดดินเสนาและชุดดินอยุธยามีปริมาณการดูดใช้ฟอสฟอรัสได้มากกว่าชุดดินท่าเรือ ซึ่งมีปริมาณอินทรียวัตถุต่ำกว่า นอกจากนี้ การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นย่อมมีผลโดยตรงต่อปริมาณการดูดใช้ฟอสฟอรัสของพืชที่สูงขึ้นตามไปด้วย สอดคล้องกับรายงานของ Sukyankij *et al.* (2015) ซึ่งศึกษาผลของระดับฟอสฟอรัส (0 - 7 กก. P_2O_5 /ไร่) ต่อผลผลิตและการดูดใช้ฟอสฟอรัสในข้าวพันธุ์ กข41 พบว่าปริมาณการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่สูงขึ้นมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของการดูดใช้ฟอสฟอรัสในข้าว นอกจากนี้ ช่วงอายุในการเจริญของข้าวก็มีผลต่อการดูดใช้

ฟอสฟอรัสเช่นกัน โดยข้าวที่อยู่ในระยะแตกกอสูงสุด (ประมาณ 70 วันหลังหว่านเมล็ด) จะมีปริมาณการดูดใช้ฟอสฟอรัสสูงกว่าข้าวในระยะกล้าหรือระยะเก็บเกี่ยว

การประเมินอัตราการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสม

อัตราการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสมทำการประเมินโดยดัดแปลงจากวิธีการของ Cuong *et al.* (2017) โดยใช้พื้นฐานจากสมการกำลังสอง (quadratic equation) เพื่อสร้างกราฟระหว่างผลผลิตและอัตราการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากนั้นหาจุดสูงสุดของเส้นกราฟโดยคำนวณค่า x (ปริมาณการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่จะมีผลให้ข้าวได้ผลผลิตสูงสุด) แล้วจึงแทนค่าตัวแปร x ในสมการ $y = ax^2 + bx + c$ ซึ่งได้จุดสูงสุดของเส้นกราฟ (ค่าผลผลิตสูงสุด) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการสร้างกราฟระหว่างผลผลิตและอัตราการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส ได้สมการประเมินอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสมสำหรับข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในชุดดินท่าเรือ เสนา และอยุธยา (Table 4 และ Figure 1) โดยอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสมสำหรับข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในชุดดินท่าเรือ เสนา และอยุธยามีค่าเท่ากับ 0.133, 0.127 และ 0.102 ก. P_2O_5 /กระถาง ซึ่งจะให้ได้ผลผลิตสูงสุดที่ได้จากการประเมินด้วยสมการดังกล่าวเท่ากับ 14.50, 29.38 และ 24.79 ก./กอ ตามลำดับ

Table 3. Effects of different rates of phosphorus fertilizer on phosphorus uptake in Pathum Thani 1 rice

Rates of P_2O_5 (g/pot)	Soil series								
	P uptake in straw (g/hill) ¹			P uptake in grain (g/hill) ¹			Total P uptake (g/hill) ¹		
	Tr	Se	Ay	Tr	Se	Ay	Tr	Se	Ay
0	0.21	0.27 ^c	0.27 ^b	0.03 ^b	0.08 ^c	0.08 ^b	0.25 ^c	0.35 ^d	0.35 ^b
0.04	0.23	0.32 ^b	0.48 ^a	0.06 ^{ab}	0.13 ^b	0.11 ^{ab}	0.29 ^c	0.45 ^c	0.60 ^a
0.08	0.28	0.38 ^{ab}	0.40 ^a	0.07 ^a	0.15 ^b	0.14 ^a	0.35 ^b	0.52 ^b	0.54 ^a
0.16	0.33	0.48 ^a	0.42 ^a	0.09 ^a	0.21 ^a	0.14 ^a	0.42 ^a	0.69 ^a	0.57 ^a
F-test	ns	**	**	**	**	**	*	**	**
CV (%)	20.9	9.58	10.2	17.7	14.7	11.7	17.7	7.91	9.66

¹ Means within the same column followed by the same letters indicate no significantly different among treatments using DMRT; **, * significant difference at 0.01 and 0.05 probability levels, ^{ns} not significant

Table 4. Maximum grain yield and optimum rate of phosphorus fertilizer in three soil series with calculated from quadratic equation

Soil series	Quadratic equation	Maximum yield (g/hill)	Optimum P fertilizer (g/pot)
Tr	$y = -325.19x^2 + 86.458x + 8.7251$	14.50	0.133
Se	$y = -723.34x^2 + 184.13x + 17.667$	29.38	0.127
Ay	$y = -1000.3x^2 + 204.09x + 14.376$	24.79	0.102

y = maximum yield of rice (g/hill); x = optimum rate of P fertilizer (g/pot) with calculated from equation ($x = -b/2a$)

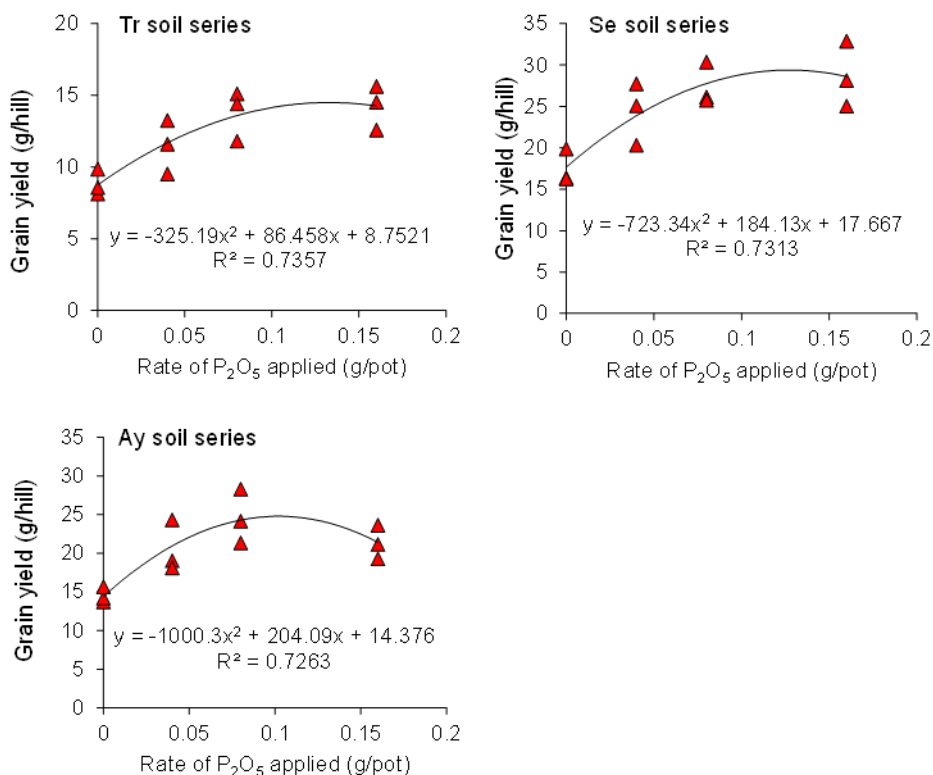


Figure 1. Quadratic regression model for estimating the maximum yield of rice and optimum rate of P fertilizer in three soil series

การประเมินอัตราการใช้ปุ๋ยที่เหมาะสมสำหรับพืชปลูกในแต่ละพื้นที่ถือเป็นสิ่งสำคัญประการหนึ่ง ทั้งนี้อัตราปุ๋ยที่มากหรือน้อยเกินไปย่อมส่งผลให้พืชที่ปลูกสร้างผลผลิตได้ไม่เต็มที่ ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น การประเมินปริมาณการใส่ปุ๋ยที่เหมาะสมนั้น

สามารถประเมินได้จากสมการหลากหลายสมการ การใช้สมการกำลังสองหรือ quadratic equation นั้น เป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยม (Zhang *et al.*, 2018; Jiang *et al.*, 2020) ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการประเมินอัตราการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่มีความจำเพาะ

สำหรับดินในแต่ละพื้นที่ที่ใช้สมการกำลังสองเป็นพื้นฐานในการประเมินได้อัตราการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสมสำหรับข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในชุดดินท่าเรือ เสนา และอยุธยา เท่ากับ 0.133, 0.127 และ 0.102 ก. P_2O_5 /กระถาง หรือเมื่อเทียบเป็นปริมาณอัตราปุ๋ยต่อไร่เท่ากับ 8.299, 7.925 และ 6.365 กก. P_2O_5 /ไร่ ตามลำดับ เมื่อใช้อัตราการใส่ปุ๋ยดังกล่าว ไปประเมินผลผลิตจากสมการกำลังสอง ข้าวปทุมธานี 1 ให้ผลผลิตสูงสุดเท่ากับ 14.50, 29.38 และ 24.79 ก./กระถาง หรือเท่ากับ 371, 752 และ 635 กก./ไร่ (ใช้ระยะห่างในการปักดำ 25 x 25 ซม.) สำหรับข้าวที่ปลูกในชุดดินท่าเรือ เสนา และอยุธยา ตามลำดับ ทั้งนี้ Department of Agriculture (2005) ได้แนะนำอัตราการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสสำหรับข้าวไม่ไวต่อช่วงแสง โดยแบ่งเป็นการใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินและการใส่ปุ๋ยตามชนิดเนื้อดินดังนี้ ในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์น้อยกว่า 5, 5 - 10 และมากกว่า 10 มก. P/กก. แนะนำให้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตรา 6, 3 และ 0 กก. P_2O_5 /ไร่ ตามลำดับ ส่วนการใส่ปุ๋ยตามลักษณะเนื้อดินนั้นแนะนำให้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสอัตรา 4 กก. P_2O_5 /ไร่ ในดินที่มีลักษณะเป็นดินเหนียวหรือดินเนื้อละเอียด ขณะที่ Rice Department (2019b) แนะนำการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสตามลักษณะเนื้อดินไว้ที่ 5 - 7 กก. P_2O_5 /ไร่ สำหรับข้าวไม่ไวแสงที่ปลูกในดินเนื้อละเอียด ทั้งนี้จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ได้จากการคำนวณโดยสมการกำลังสองที่ได้จากการทดลองนั้นสูงกว่าอัตราตามคำแนะนำของ Department of Agriculture (2005) และ Rice Department (2019b) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากสมบัติดินอื่น ๆ เช่น พีเอชของดินที่อยู่ในระดับเป็นกรดรุนแรงของชุดดินเสนา ปริมาณอินทรียวัตถุที่อยู่ในระดับสูงมากทั้งในชุดดินเสนาและชุดดินอยุธยา รวมถึงปริมาณแคดไอออนอื่น ๆ ได้แก่ โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ที่อยู่ในระดับสูงถึงสูงมาก ในทั้งสามชุดดิน ปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้มีส่วนส่งเสริมให้ดินเกิดการตรึงฟอสฟอรัสสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ในดินซึ่งพืชสามารถดูดไปใช้ได้มีค่าลดลง (Havlin *et al.*, 2017) และจาก

รายงานของ Roberts and Johnston (2015) ระบุว่าเมื่อใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสลงดิน ฟอสฟอรัสเกิดการเปลี่ยนรูปซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 4 กลุ่ม และมีปริมาณน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ของปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ใส่ลงไปถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ทันที และอาจเป็นเหตุผลที่ทำให้ปริมาณปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ได้จากการคำนวณสำหรับข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในดินจังหวัดพระนครศรีอยุธยามีปริมาณมากกว่าอัตราแนะนำของหน่วยงานที่กล่าวมาข้างต้น

สรุป

การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสมีผลอย่างชัดเจนต่อผลผลิตข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในดินทั้งสามชุดดินของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ผลผลิตข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในชุดดินท่าเรือและชุดดินเสนามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ในชุดดินอยุธยาข้าวปทุมธานี 1 มีการตอบสนองต่อการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสสูงสุดที่อัตรา 0.08 ก. P_2O_5 /กระถาง ซึ่งอัตราดังกล่าวเป็นอัตราที่ให้ผลผลิตเมล็ดสูงสุด ในส่วนของการดูใช้ฟอสฟอรัสในข้าวปทุมธานี 1 นั้นปริมาณการดูใช้ฟอสฟอรัสมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณการใส่ปุ๋ย เมื่อทำการประเมินการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสโดยใช้สมการกำลังสองเพื่อให้ได้อัตราการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสมสำหรับข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในดินจังหวัดพระนครศรีอยุธยาพบว่าอัตราปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสมสำหรับข้าวปทุมธานี 1 ที่ปลูกในชุดดินท่าเรือ เสนา และอยุธยา มีค่าเท่ากับ 0.133, 0.127 และ 0.102 ก. P_2O_5 /กระถาง ผลผลิตสูงสุดที่ประเมินได้จากการใส่ปุ๋ยในอัตราดังกล่าวเท่ากับ 14.50, 29.38 และ 24.79 ก./กระถางตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

Akinrinde, E.A. and T. Gaizer. 2006. Differences in the performance and phosphorus-use efficiency of some tropical rice (*Oryza*

- sativa* L.) varieties. Pakistan Journal of Nutrition 5(3): 206-211.
- Attanandana, T. 1993. Deficiencies and toxicities of some nutrient elements in acid sulfate soils of Thailand. Agriculture and Natural Resources 27(4): 508-515.
- Attanandana, T. and J. Chanchareonsook. 1999. Manual of Soil and Plant Analysis. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok. 108 p. (in Thai)
- Attanandana, T. and S. Vacharotayan. 1986. Acid sulfate soils: Their characteristics, genesis, amelioration and utilization. Japanese Journal of Southeast Asian Studies 24(2): 154-180.
- Bray, R.H. and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. Soil Science 59(1): 39-46.
- Ch'ng, H.Y., O.H. Ahmed and N.M.Ab. Majid. 2014. Improving phosphorus availability in an acid soil using organic amendments produced from agroindustrial wastes. The Scientific World Journal 2014: 506356, doi: 10.1155/2014/506356.
- Cuong, T.X., H. Ullah, A. Datta and T.C. Hanh. 2017. Effects of silicon-based fertilizer on growth, yield and nutrient uptake of rice in tropical zone of Vietnam. Rice Science 24(5): 283-290.
- Darunsontaya, T., P. Thasanon, W. Jindaluang and K. Poomsong. 2020. Kinetics of potassium release of lowland soils in Central Plain of Thailand. Journal of Agriculture 36(1): 123-133. (in Thai)
- Department of Agriculture. 2005. Guidance of Fertilizer Use in Economic Crops. Office of the Secretary, Department of Agriculture, Bangkok. 121 p. (in Thai)
- Dreher, P. and E.-A. Niederbudde. 1994. Potassium release from micas and characterization of the alteration products. Clay Minerals 29(1): 77-85.
- Division of Soil Survey and Soil Resource Research. 2019. Soil map of Phra Nakhon Si Ayutthaya province. (Online). Available: http://oss101.ldd.go.th/web_thaisoilinf/central/Ayutthaya/ay_map/ay_series/ay_series58.html (July 7, 2019). (in Thai)
- Dobermann, A. and T. Fairhurst. 2000. Rice: Nutrient Disorders and Nutrient Management. Oxford Graphic Printers, Singapore. 191 p.
- Fageria, V.D. 2001. Nutrient interactions in crop plants. Journal of Plant Nutrition 24(8): 1269-1290.
- FAO Project Staff and Land Classification Division. 1973. Soil Interpretation Handbook for Thailand. Land Classification Division, Department of Land Development, Bangkok. 169 p.
- Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. pp. 383-411. In: A. Klute (ed.). Methods of Soil Analysis Part 1: Physical and Mineralogical Methods. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin.
- Havlin, J.L., S.L. Tisdale, W.L. Nelson and J.D. Beaton. 2017. Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management. 8th ed. Pearson, Boston. 520 p.
- Jiang, W., Y. Xing, X. Wang, X. Liu and Z. Cui. 2020. Developing a sustainable management strategy for quantitative estimation of optimum nitrogen fertilizer

- recommendation rates for maize in Northeast China. *Sustainability* 12(7): 2607, doi: 10.3390/su12072607.
- Kuo, S. 1996. Phosphorus. pp. 869-919. *In*: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston and M.E. Sumner (eds.). *Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin.
- Mala, T. 2007. *Organic Fertilizer and Biofertilizer: Production Technique and Usage*. Kasetsart University Press, Bangkok. 300 p. (in Thai)
- Michel, L. and D. Makowski. 2013. Comparison of statistical models for analyzing wheat yield time series. *PLoS ONE* 8(10): e78615, doi: 10.1371/journal.pone.0078615.
- Pierzynski, G.M., R.W. McDowell and J.T. Sims. 2005. Chemistry, cycling, and potential movement of inorganic phosphorus in soils. pp. 53-86. *In*: J.T. Sims and A.N. Sharpley (eds.). *Phosphorus: Agriculture and the Environment*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin.
- Rice Department. 2019a. Rice knowledge bank: Pathum Thani 1 rice. (Online). Available: <http://webold.ricethailand.go.th/rkb3/title-index.php-file=content.php&id=67.htm> (March 25, 2019). (in Thai)
- Rice Department. 2019b. Rice knowledge bank: Management of soil and fertilizer in paddy field. (Online). Available: <https://webold.ricethailand.go.th/rkb3/title-index.php-file=content.php&id=021.htm> (March 3, 2019). (in Thai)
- Rhoades, J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. pp. 417-435. *In*: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston and M.E. Sumner (eds.). *Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin.
- Roberts, T.L. and A.E. Johnston. 2015. Phosphorus use efficiency and management in agriculture. *Resources, Conservation and Recycling* 105: 275-281.
- Sukitprapanon, T., A. Suddhiprakarn, I. Kheoruenromne, S. Anusontpornperm and R.J. Gilkes. 2016. A comparison of potential, active and post-active acid sulfate soils in Thailand. *Geoderma Regional* 7(3): 346-356.
- Sukyankij, S., S. Jewprasert, W. Pangjai and T. Panich-pat. 2021a. Comparison of the quality of two organic fertilizers on yield of Hom Pathum rice and soil properties. *Khon Kaen Agriculture Journal* 49(1): 37-48. (in Thai)
- Sukyankij, S., S. Samithiarporn and T. Pluemphuak. 2017. Effect of rice straw management and green manures on soil chemical properties of Ayutthaya soil series. pp. 2507-2517. *In*: *Proceedings of the 14th KU-KPS National Conference*. Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom. (in Thai)
- Sukyankij, S., S. Sawatdikarn, S. Samithiarporn and T. Panich-pat. 2021b. Effects of lime material and waterlogging period on availability of phosphorus and yield of Hom Pathum rice in soils of Phranakhon Si Ayutthaya province. *Khon Kaen*

- Agriculture Journal 49(4): 842-855. (in Thai)
- Sukyankij, S., T. Pluemphuak and T. Panich-pat. 2015. Effect of phosphorus level on growth, yield and phosphorus uptake in rice RD41. pp. 1751-1758. *In: Proceedings of the 12th KU-KPS National Conference.* Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom. (in Thai)
- Sukyankij, S., T. Pluemphuak and T. Panich-pat. 2019. Effects of green manures and fertilizer managements on yield, nutrient uptake and economic return of rice cv. RD47 grown in Ayutthaya soil series. *Journal of Agriculture* 35(1): 61-73. (in Thai)
- Thai Rice Mills Association. 2022. The report of rice price in 2022. (Online). Available: <http://www.thairicemillers.org/index.php?lay=show&ac=article&Ntype=19> (April 29, 2022). (in Thai)
- Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cations. pp. 159-165. *In: A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney (eds.). Methods of Soil Analysis Part 2: Chemical and Microbiological Properties.* Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin.
- Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. pp. 475-490. *In: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston and M.E. Sumner (eds.). Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods.* Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin.
- Walkley, A., and I.A. Black. 1934. An examination of Degtjareff methods for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37(1): 29 - 38.
- Westerman, R.L. 1990. *Soil Testing and Plant Analysis.* 3rd ed. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
- Zhang, M., J. Li, F. Chen and Q. Kong. 2018. Unary non-structural fertilizer response model for rice crops and its field experimental verification. *Scientific Reports* 8: 2792, doi: 10.1038/s41598-018-21163-w.
-