

ผลร่วมของซิลิคอน ปุ๋ยเคมีและมูลวัวต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 ที่ปลูกในดินทราย

Interactive effect of silicon, chemical fertilizer and cow manure on growth and yield of glutinous rice, RD6 variety planted in a sandy soil

พรพิมล คำโมง¹ และ อนงนาฏ ศรีประโชติ^{1*}

Pornpimol Khammong¹ and Anongnat Sriprachote^{1*}

¹ สาขาวิชาปฐพีศาสตร์และสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ. เมือง จ. ขอนแก่น 40000

¹ Department of Soil Science and Environment, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Muang, Khon Kaen, 40000

บทคัดย่อ: ศึกษาผลร่วมของซิลิคอน ปุ๋ยเคมีและมูลวัวต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 ที่ปลูกในดินทราย ทำการทดลองในกระถาง วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ มี 2 ปัจจัย ปัจจัยที่ 1 คือ ชนิดของปุ๋ย ได้แก่ ปุ๋ยเคมี มูลวัว และปุ๋ยเคมีร่วมกับมูลวัว และปัจจัยที่ 2 คือ อัตราของซิลิคอนที่แตกต่างกัน ประกอบด้วย 0, 100, 200 และ 300 มก./กก. ทำการทดลองทั้งหมด 4 ซ้ำ ผลการทดลองพบว่า การใส่ปุ๋ยเคมีและมูลวัวร่วมกับซิลิคอนในอัตรา 200 หรือ 300 มก./กก. เพิ่มการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพผลผลิตของข้าว นอกจากนี้การใส่ซิลิคอนในอัตราที่สูงขึ้นทำให้ปริมาณซิลิคอนทั้งหมดในพืชสูงขึ้นตามไปด้วย ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการจัดการธาตุอาหารที่เหมาะสมสามารถเพิ่มผลผลิตของข้าวที่ปลูกในดินทรายได้

คำสำคัญ: มูลวัว; ปุ๋ยเคมี; ซิลิคอน; ข้าว; ดินทราย

ABSTRACT: The study examined the combined effects of silicon, chemical fertilizer, and cow manure on the development and productivity of the RD6 variety of glutinous rice cultivated on sandy soil. The investigation was conducted in a pot. The experimental design was a randomized complete design with 4 replications of 2 factors: factor 1 was the type of fertilizer used, which included chemical fertilizer, cow manure, and chemical fertilizer combined with cow manure, and factor 2 was the variation in silicon rates. There were 4 different amounts of silicon: 0, 100, 200, and 300 mg/kg. The results showed that using chemical fertilizer coupled with cow manure and applying 200 or 300 mg /kg improved rice growth, yield, and quality. Furthermore, the rate of silicon application increased the overall silicon contents in plants. This finding suggested that adequate fertilizer management might improve rice yields grown on sandy soil.

Keywords: cow manure; chemical fertilizer; silicon; rice; sandy soil

บทนำ

ขอนแก่นมีพื้นที่ประมาณ 7 ล้านไร่ เป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติต่ำ โดยมีเนื้อที่ประมาณ 4,357,903 ไร่ คิดเป็น 64.1% ของพื้นที่ดินทรายจัด มีเนื้อที่ประมาณ 1,137,812 ไร่ คิดเป็น 14.0% ดินเค็ม มีเนื้อที่ประมาณ 334,984 ไร่ คิดเป็น 6.39% ดินต้นถึงขั้นกรวดลูกรังและเศษหิน และ ดินต้นถึงขั้นมาร์ลหรือก้อนปูน มีเนื้อที่ประมาณ 32,535 ไร่ คิดเป็น 4.73% ดินลิกปาน

* Corresponding author: anonsr@kku.ac.th

Received: date; December 8, 2023 Revised: date; June 4, 2024

Accepted: date; June 12, 2024 Published: date; July 12, 2024

กลางถึงชั้นหินก้อนหรือลูกรัง มีเนื้อที่ประมาณ 32,084 ไร่ คิดเป็น 4.81% พื้นที่ที่มีความลาดชันมากกว่า 35% มีเนื้อที่ประมาณ 32,672 ไร่ หรือ คิดเป็น 0.48% ของเนื้อที่ทั้งหมด (กรมพัฒนาที่ดิน, 2560) ทั้งนี้พบชุดดินน้ำพอง มีเนื้อที่ประมาณ 1 ล้านไร่ มีปริมาณธาตุอาหารต่ำ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 3.5 ก./กก. ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 33.2 มก./กก. ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 26.2 มก./กก. และปริมาณซิลิกอนที่แลกเปลี่ยนได้ 63.0 มก./กก. ซึ่งเป็นดินที่ไม่เหมาะแก่การทำเกษตรกรรม (พินดา และคณะ, 2560) จึงทำให้ประสบปัญหาผลผลิตทางการเกษตรต่ำ ซึ่งเกษตรกรในพื้นที่ส่วนใหญ่มีอาชีพทำนาปลูกข้าว ประมาณ 2,547,354 ไร่ คิดเป็น 37.4% ของการทำเกษตร (กรมพัฒนาที่ดิน, 2560) เกษตรกรนิยมปลูกข้าวเหนียว พันธุ์ข้าว กข 6 เป็นข้าวเหนียวทนแล้ง ทนต่อโรคพืช และแมลง มีผลผลิตที่สูงถึง 666 กก./ไร่ มีกลิ่นหอม เป็นข้าวไวต่อช่วงแสง ปลูกในช่วงนาปี (กรมการข้าว, 2560) ทั้งนี้ข้าวมีความต้องการปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 3.6 % ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด 0.2% ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด 2.4% และปริมาณซิลิกอนทั้งหมด 11% ซึ่งเป็นปริมาณเพียงพอที่ข้าวจะเจริญเติบโต (Tanaka and Yoshida, 1975)

ซิลิกอน (Si) พบมากตามธรรมชาติอยู่ในรูป SiO_2 ซิลิกอนในดินจะพบในรูปผลึกและอสัณฐาน รูปที่ถูกดูดซับหรือตกตะกอนกับ hydrous oxide ของ Al^{+3} Fe^{+3} และ Mn^{+2} และอยู่ในรูปสารละลายในดิน ส่วนกรดโมโนซิลิก $[\text{H}_4\text{SiO}_4$ หรือ $\text{Si}(\text{OH})_4$] เป็นรูปที่พืชสามารถดูดใช้ได้ แต่พบในดินปริมาณน้อยมาก (ยงยุทธ, 2552) ในปัจจุบันได้นำซิลิกอนมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตร ซึ่งนำมาใช้รูปแบบของปุ๋ยเคมีสังเคราะห์ชนิดเม็ดและชนิดน้ำ ซิลิกอนเป็นธาตุเสริมประโยชน์ที่มีความสำคัญและจำเป็นต่อพัฒนาและการเจริญเติบโตของพืช (ยงยุทธ, 2552) มีรายงานว่าซิลิกอนทำให้ใบพืชมีความแข็งแรง เพิ่มความแข็งแรงของผนังเซลล์ และเป็นธาตุที่ช่วยกระตุ้นและมีประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น ช่วยในการเจริญของเปลือกหุ้มเมล็ดข้าว มีผลสืบเนื่องถึงคุณภาพของเมล็ดข้าว เมื่อดันข้าวได้รับซิลิกอนน้อย ก็จะทำให้เปลือกเมล็ดข้าวมีซิลิกอนต่ำ ทำให้เมล็ดข้าวมีคุณภาพต่ำ (Synder et al., 2007) การศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าข้าวเป็นพืชที่มีปริมาณซิลิกอนสะสมได้มากถึง 10-15% ของน้ำหนักแห้ง (Ma and Takahashi, 2002) และพบว่าสะสมในใบมากที่สุดถึง 10% และรองลงมาในลำต้น 5% (ยงยุทธ, 2552) ซิลิกอนที่ถูกดูดเข้าไปในลำต้นข้าว มีความสำคัญต่อการช่วยให้ใบตั้งตรง เพิ่มความแข็งแรงของลำต้น ช่วยลดการหักล้ม (Mengel et al., 2001) ซิลิกอนจึงจำเป็นต่อต้นข้าวอย่างมาก เนื่องจากช่วยเพิ่มความหนาของผนังเซลล์ ทำให้ต้นข้าวเกิดความเหนียว ช่วยป้องกันโรคพืช และแมลงศัตรูพืช และระบบรากที่สมบูรณ์ ทำให้รากข้าวมีการยึดเหนี่ยวที่แข็งแรง ลำต้นตั้งตรงไม่หักล้มง่าย ช่วยให้การสังเคราะห์แสง และสร้างอาหารได้ดี ส่งผลทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Ma and Takahashi, 2002) Hanan et al. (2017) ระบุว่าการปุ๋ยไนโตรเจนและปุ๋ยฟอสฟอรัสร่วมกับซิลิกอนอัตรา 1.8 ก./กระถาง ให้ผลผลิตของข้าวสูงสุด 48.9 ก. รองลงมาคือการทดลองที่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนและปุ๋ยโพแทสเซียมร่วมกับซิลิกอน มีผลผลิต 41.6 ก. ในขณะที่การทดลองที่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเพียงอย่างเดียวร่วมกับซิลิกอน มีผลผลิต 29.5 ก. Kovacs et al. (2022) มีการประเมินว่าหลังการเก็บเกี่ยวข้าว ธาตุซิลิกอนได้ถูกดูดไปกับฟางข้าวจำนวนมาก และได้ถูกนำออกจากพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 8–48 กก./ไร่ ในแต่ละรอบการเพาะปลูก จึงทำให้เกิดการขาดแคลนซิลิกอนในดินในรูปที่เป็นประโยชน์ เนื่องจากซิลิกอนมีบทบาทในการควบคุมการพัฒนาของระบบรากพืช เพิ่มความต้านทานต่อความเครียดที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม

ปุ๋ยเคมี เป็นปุ๋ยสังเคราะห์ที่ให้ปริมาณธาตุอาหารหลัก คือ ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ที่พืชต้องการเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตของพืช เป็นปุ๋ยที่สามารถละลายน้ำได้เร็ว พืชจึงสามารถดูดใช้ธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ได้ทันที (กรมพัฒนาที่ดิน, 2550) ซึ่งข้าวต้องการธาตุไนโตรเจน 25.6 กก./ไร่ ฟอสฟอรัส 5.6 กก./ไร่ โพแทสเซียม 43.2 กก./ไร่ (นคราญ และคณะ, 2558) มูลวัว หรือ ปุ๋ยคอก เป็นปุ๋ยที่มีความสำคัญต่อการปรับปรุงดิน และให้ธาตุอาหารแก่พืช ทำให้ดินร่วนซุย เพื่อเพิ่มอินทรีย์วัตถุ สามารถอุ้มน้ำได้ดีขึ้น (กรมพัฒนาที่ดิน, 2550) การใช้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยคอก ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยลดการสูญเสียปุ๋ยเคมี เนื่องจากปุ๋ยคอกช่วยดูดซับไออนอนที่ค่อย ๆ ปลดปล่อยจากปุ๋ยเคมี (ยงยุทธ, 2552) สมชาย และ พัทธรัญญ (2560) ระบุว่า ข้าวที่ได้รับปุ๋ยเคมี ร่วมกับปุ๋ยมูลวัวในอัตรา 160 และ 320 กก./ไร่ ข้าวมีการแตกกอ และมีน้ำหนักเมล็ดดีกว่า การใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว อีกทั้งการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับปุ๋ยมูลวัว ทำให้ผลผลิตและปริมาณธาตุอาหารในดินเพิ่มขึ้น งานวิจัยในอินเดียแสดงให้เห็นว่า การใช้ปุ๋ยเคมี 30% ร่วมกับมูลวัว 70% สามารถเพิ่มผลผลิตข้าวได้มากกว่า 20% เมื่อเทียบกับการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การใช้มูลวัวช่วยเพิ่มอินทรีย์วัตถุในดิน ทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ และส่งผลให้พืชเจริญเติบโตได้ดีขึ้น (Lamichhane et al., 2022) งานวิจัยในเวียดนาม พบว่า การใช้ปุ๋ยเคมีในอัตรา

50% ของอัตราแนะนำร่วมปุ๋ยคอกอัตรา 31.3 Mt ha⁻¹ ช่วยเพิ่มผลผลิตข้าวได้ถึง 25% โดยมีการปรับปรุงคุณภาพดินและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ (Iqbal et al., 2022)

จากที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อหาแนวทางในการลดข้อจำกัดในการปลูกข้าวและผลผลิตข้าวในพื้นที่ดินทราย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้ซิลิคอนร่วมปุ๋ยเคมี และมูลวัวต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวพันธุ์ กข6 ที่ปลูกบนดินทรายชุดดินน้ำพอง

วิธีการศึกษา

การเตรียมตัวอย่างดินและมูลวัว

เก็บตัวอย่างชุดดินน้ำพอง (Loamy, siliceous, isohyperthermic Grossarenic Haplustalfs) เป็นดินทรายร่วน (loamy sand) ที่แปลงเกษตรกร (16°65'14.895"N, 102°81'54 324"E) ตำบลม่วงหวาน อำเภอน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น โดยเก็บแบบซิกแซกที่ความลึก 0-15 ซม. จากหน้าดิน สุ่มเก็บกระจายทั่วแปลงจำนวน 20 จุด จุดละ 30 กก. นำดินมาผึ่งในที่ร่มให้แห้ง (air dry) เลือกเศษก้อนหิน และซากพืชขนาดใหญ่ออก ผึ่งดินในที่ร่มผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันเพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอ จากนั้นนำดินมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มม. จากนั้นนำดินมาชั่งใส่กระถาง ปริมาณ 6 กก./กระถาง โดยดินในกระถางมีความสูง 27 ซม.

จากนั้นนำตัวอย่างดิน มาผึ่งลมให้แห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 2 มม. ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน และสุ่มตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีก่อนทำการทดลอง ประกอบด้วย ปฏิบัติการของดิน วัดโดยเครื่องวัด pH Meter โดยใช้อัตราส่วนระหว่างดินต่อน้ำ เท่ากับ 1:5 (Black, 1965) ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน โดยวิธี wet oxidation (Walkley and Black, 1934) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ สกัดโดยวิธี Bray II แล้ววัดด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Bray and Kurtz, 1945) ปริมาณโพแทสเซียม และแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ โดยสกัดด้วยสารละลาย 1 N NH₄OAc pH 7.0 และวิเคราะห์ปริมาณด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) (Thomas, 1982) ปริมาณซิลิคอนที่แลกเปลี่ยนได้ สกัดดินด้วยน้ำยาสกัด 0.5 M CH₃COOH และวิเคราะห์ปริมาณด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) (Hallmark et al., 1982) ผลการวิเคราะห์พบว่า ดินก่อนการทดลองมีค่า pH 5.9 มีอินทรีย์วัตถุ 3.5 ก./กก. มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 1.7 ก./กก. ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 5.75 มก./กก. ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 1.9 มก./กก. ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 7.83 มก./กก. และซิลิคอนที่แลกเปลี่ยนได้ 4.96 มก./กก. ดินส่วนที่เหลือนำไปใส่ในกระถางขนาด 23.5x23.5x34 ซม. เพื่อทำการทดลอง

เตรียมตัวอย่างมูลวัวเช่นเดียวกับเตรียมตัวอย่างดิน และวิเคราะห์สมบัติทางเคมีเช่นเดียวกับตัวอย่างดินดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ด้วยวิธี Kjeldahl Method (Jackson, 1958) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด และปริมาณแคลเซียมทั้งหมด ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) หลังจากย่อยตัวอย่างด้วยกรดผสมเข้มข้น HNO₃ กับ HClO₄ อัตราส่วน 4:1 โดยปริมาตร (Chapman, 1978) และปริมาณซิลิคอนทั้งหมด ที่สกัดด้วย 0.1 N NaOH และ 30% Hydrogen Peroxide การวิเคราะห์ปริมาณด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) (Hallmark et al., 1982) ผลการวิเคราะห์พบว่า มูลวัวมีค่า pH 8.8 มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 5.9 ก./กก. ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด 1.7 มก./กก. ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด 21.5 มก./กก. ปริมาณแคลเซียมทั้งหมด 3.2 มก./กก. และซิลิคอนทั้งหมด 52 มก./กก.

วางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design : CRD) จำนวน 4 ซ้ำ ประกอบด้วย 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยที่ 1 ชนิดของปุ๋ย ได้แก่ 1. ปุ๋ยเคมี 16-16-8 อัตรา 25 กก./ไร่ หรือ 0.8 มก./กก. (0.48 ก./กระถาง) 2. มูลวัว อัตรา 1000 กก./ไร่ หรือ 32.05 มก./กก. (19 ก./กระถาง) 3. ปุ๋ยเคมี 16-16-8 อัตรา 0.8 มก./กก. ร่วมกับมูลวัว อัตรา 32.05 มก./กก. และปัจจัยที่ 2 ได้แก่ ซิลิคอน อัตรา 0 มก./กก. , 100 มก./กก. (0.6 ก./กระถาง), 200 มก./กก. (1.2 ก./กระถาง) และ 300 มก./กก. (1.8 ก./กระถาง) ในรูปแคลเซียมซิลิเกต (Ca₃SiO₄) ชนิดผง โดยแบ่งใส่ปุ๋ยจำนวน 2 ครั้ง ครั้งละเท่า ๆ กัน ดังนี้ ครั้งที่ 1 ใส่ปุ๋ยก่อนปลูก

ข้าว 1 สัปดาห์ และ ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยที่ระยะแตกกอ หรือ 60 วันหลังปักดำ จากนั้นทำการปลูกข้าว โดยเตรียมเมล็ดข้าว กข6 โดยแช่น้ำทิ้งไว้ 1 คืน จากนั้นห่มด้วยผ้าขาวบาง ทิ้งไว้ 3 วัน เก็บไว้ในที่ร่ม เมื่อเมล็ดข้าวเริ่มงอกนำไปหว่านในกระเบะเพาะกล้าขนาด 50x70 ซม. รดน้ำให้ชุ่มทุกวัน เมื่อต้นกล้ามีอายุ 21 วัน นำไปปักดำกระถางละ 3 ต้น เมื่อปักดำได้ 35 วัน ทำการถอนต้นกล้าให้เหลือ 1 ต้น ปลูกไว้ในที่โล่งแจ้ง โดยรักษาระดับน้ำไว้ที่ 3 ซม.จากระดับผิวน้ำดินตลอดการทดลอง และปล่อยให้น้ำแห้งเมื่อข้าวอายุได้ 90 วัน

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุอาหารในพืช

เมื่อข้าวอายุครบ 150 วัน ทำการเก็บเกี่ยวผลผลิต ที่ความชื้น 20% โดยเก็บส่วนเหนือดิน และแยกเป็นส่วนของตอซัง และรวงนำตัวอย่างพืชอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70 °C จนน้ำหนักคงที่ จากนั้นชั่งน้ำหนักแห้ง และบดตัวอย่างพืชจนละเอียด นำไปวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และซิลิกอน ด้วยวิธีเดียวกับการวิเคราะห์มูลวัวดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

บันทึกผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

บันทึกผลการทดลอง โดยการประเมินการเจริญเติบโตและผลผลิต ดังนี้ ความสูงของต้นข้าว และจำนวนต้นข้าวต่อกระถาง (การแตกกอ) โดยเก็บข้อมูลที่ 60 วัน 90 วัน 120 วัน และ 150 วัน น้ำหนักแห้งของต้นข้าว ผลผลิต และองค์ประกอบผลผลิตที่ระยะเก็บเกี่ยว 150 วัน ได้แก่ จำนวนรวงต่อต้น จำนวนเมล็ดต่อรวง ผลผลิตกรัมต่อกระถาง เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเมล็ดดี น้ำหนัก 1,000 เมล็ด และผลผลิตต่อกระถาง และ หาปริมาณการดูดใช้ธาตุอาหารพืช (ก./กระถาง) คำนวณจาก ความเข้มข้นของธาตุอาหารในเนื้อเยื่อพืช (ก./กก.) คูณด้วยน้ำหนักแห้ง (ก.) หาดัชนีการเก็บเกี่ยว Harvest index (HI) คำนวณจาก ผลผลิต (น้ำหนักแห้งเมล็ด)หารด้วยน้ำหนักแห้ง (ทั้งหมด) และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ด้วยโปรแกรม statistix 10 และทดสอบความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการศึกษา

การเจริญเติบโตของข้าว

ความสูงของข้าวเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นในทุกตำรับการทดลอง จากผลการทดลองเมื่อข้าวมีอายุครบ 150 วัน พบว่าชนิดของปุ๋ยและซิลิกอนมีผลต่อความสูง และการแตกกอของข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งการใช้ปุ๋ยเคมีและมูลวัวร่วมกับซิลิกอนส่งผลให้ข้าวมีความสูง และการแตกกอสูงสุด รองลงมาคือ การใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับซิลิกอน และการใส่ปุ๋ยมูลวัวร่วมกับซิลิกอนตามลำดับ โดยพบว่าตำรับการทดลองที่ใส่ซิลิกอนในอัตรา 300 มก./กก. ร่วมกับปุ๋ยเคมีและมูลวัว ต้นข้าวมีความสูงมากที่สุด คือ 150 ซม. ขณะที่ตำรับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีและมูลวัวร่วมกับซิลิกอนในอัตรา 200 มก./กก. ข้าวมีการแตกกอมากที่สุด คือ 12 ต้น (Table 1)

Table 1 Plant height and tillering at 60, 90, 120 and 150 days after transplanting

Treatment	Silicon	Transplanting							
		Height (cm)				Tillering (plant)			
		60 day	90 day	120 day	150 day	60 day	90 day	120 day	150 day
Chemical fertilizer	0	83.8cd ^{1/}	91.8ef	114cd	133c	6b	7c	8c	8cd
	100	88.8bc	99.3cd	117c	133c	6b	8b	10a	10b
	200	88.8bc	98.5d	105de	132c	6b	9a	10a	10b
	300	90.0b	100bcd	121b	135c	6b	8b	9b	9c
Cow manure	0	80.0d	88.8f	107d	125d	4d	5d	6e	6f
	100	83.8cd	92.5ef	104f	124d	4d	5d	7d	7d
	200	83.8cd	93.0e	104f	125d	5c	5d	6e	6e
	300	81.3d	98.8cd	108d	127d	5c	7c	7d	7d
Chemical fertilizer + Cow manure	0	82.5d	104d	126ab	145b	7a	8b	10a	10b
	100	92.5b	103bc	126ab	148ab	7a	9a	10a	11ab
	200	92.5b	103bc	128a	149a	7a	9a	10a	12a
	300	100.a	109a	128a	150a	7a	8b	10a	10b
Mean		87.3	98.4	116	135	6	7	8	9
F-test ^{2/}									
Fertilizer		**	**	**	*	**	**	**	**
Silicon		**	**	**	**	*	*	**	**
Fertilizer x Silicon		**	*	**	*	*	**	**	**
CV (%)		4.6	3.0	2.5	2.1	10	8.4	5.6	5.7

^{1/}Means in the column with the same letter(s) are significantly different at $P < 0.05$ by Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

^{2/}**, * = significantly different at $P \leq 0.01$ and at $P \leq 0.05$, respectively

ผลผลิตและคุณภาพผลผลิต

จากผลการทดลองแสดงน้ำหนักแห้ง และจำนวนรวงต่อต้นของข้าวที่ได้รับปุ๋ยและซิลิคอนที่แตกต่างกัน พบว่า ชนิดของปุ๋ย และปริมาณซิลิคอนมีผลต่อน้ำหนักแห้ง และจำนวนรวงต่อต้นของข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ พบว่าการใส่ปุ๋ยเคมีและมูลวัวร่วมกับซิลิคอน ข้าวมีน้ำหนักแห้ง และจำนวนรวงต่อต้นสูงที่สุด โดยดำรับการทดลองนี้ที่ใส่ปุ๋ยเคมีและมูลวัวร่วมกับซิลิคอนในอัตรา 0 100 200 และ 300 มก./กก. ข้าวมีจำนวนรวงต่อต้นเท่ากับ 2 รวง ในขณะที่ดำรับการทดลองที่เหลือข้าวมีจำนวนรวงต่อต้นเท่ากับ 1 รวง ในขณะเดียวกัน พบว่าดำรับการทดลองนี้ที่ใส่ปุ๋ยเคมีและมูลวัวร่วมกับซิลิคอนในอัตรา 300 มก./กก. ข้าวมีน้ำหนักแห้งสูงที่สุด คือ 178 ก. และเป็นที่น่าสนใจว่าเมื่อเปรียบเทียบในชุดการทดลองที่ใช้ปุ๋ยเหมือนกัน ดำรับการทดลองที่ไม่ได้ใส่ซิลิคอน ข้าวมีน้ำหนักแห้งต่ำที่สุด ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าซิลิคอนมีอิทธิพลต่อน้ำหนักแห้งของข้าว (Table 2)

Table 2 Dry matter and number of panicles at harvesting

Treatment	Silicon	Dry matter (g/pot)	Panicle number (plant/pot)
Chemical fertilizer	0	103f ^{1/}	1b
	100	131d	1b
	200	143cd	1b
	300	151c	1b
Cow manure	0	83.3g	1b
	100	96.4fg	1b
	200	105f	1b
	300	121e	1b
Chemical fertilizer + Cow manure	0	105f	2a
	100	156bc	2a
	200	164b	2a
	300	178a	2a
Mean		128	1
F-test ^{2/}			
Fertilizer		**	**
Silicon		**	**
Fertilizer x Silicon		**	**
CV (%)		4.4	3.1

^{1/}Means in the column with the same letter(s) are significantly different at $P < 0.05$ by Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

^{2/}**= significantly different at $P \leq 0.01$, respectively

ผลผลิตและคุณภาพผลผลิต

จากผลการทดลอง พบว่าชนิดของปุ๋ยและซิลิกอนมีผลต่อผลผลิต และคุณภาพผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยทำการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีและมูลวัวร่วมกับซิลิกอนในอัตรา 200 มก./กก. ข้าวให้ผลผลิตสูงสุด 149 ก./กระถาง รองลงมาคือทำการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีและมูลวัวร่วมกับซิลิกอนในอัตรา 300 มก./กก. ข้าวให้ผลผลิต 143 ก./กระถาง และ ทำการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีและมูลวัวร่วมกับซิลิกอนในอัตรา 100 มก./กก. ข้าวให้ผลผลิต 136 ก./กระถาง ตามลำดับ โดยทั้งสามทำการทดลอง มีดัชนีการเก็บเกี่ยวไม่แตกต่างกันทางสถิติ ในขณะที่ทำการทดลองที่ใส่มูลวัวและไม่ใส่ซิลิกอน ข้าวให้ผลผลิต 37.5 ก./กระถาง และดัชนีการเก็บเกี่ยว 44.0 % ต่ำที่สุด จากผลการทดลองยังพบว่า ทำการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับซิลิกอนในอัตรา 200 และ 300 มก./กก. (98.7% และ 98.6%) และ ทำการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีและมูลวัวร่วมกับซิลิกอนในอัตรา 200 และ 300 มก./กก. (98.9% และ 98.8%) ข้าวมีร้อยละเมล็ดดีสูงที่สุด และไม่แตกต่างกันทางสถิติ ในขณะที่การใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับหรือไม่ร่วมกับซิลิกอน ข้าว 1000 เมล็ด มีน้ำหนักไม่แตกต่างกันทางสถิติกับทำการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีและมูลวัว ร่วมหรือไม่ร่วมกับซิลิกอน นอกจากนี้ยังพบว่าทำการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีและมูลวัว ร่วมกับซิลิกอนในอัตรา 200 มก./กก. มีเมล็ดสูงสุด 119 เมล็ด (Table 3)

Table 3 Grain yields and quality under different fertilizer addition

Treatment	Silicon	Yield and productivity quality				
		Number of seeds per ear (seed)	Filled grain (%)	1000 grain dry weight (g) ^{3/}	Harvest index (%)	Grain yield per pot (g) ^{4/}
Chemical fertilizer	0	110cd ^{1/}	97.7b	26.3a	77.7c	80.3g
	100	112c	98.3ab	26.5a	77.6c	111d
	200	115bc	98.7a	26.2a	76.4c	123d
	300	117b	98.6a	26.4a	75.1c	133c
Cow manure	0	105e	94.7d	23.3c	44.0f	37.5i
	100	105e	96.9c	24.5b	52.7e	57.3h
	200	106de	96.5c	23.8c	54.7e	62.7h
	300	107d	96.6c	24.4b	65.0d	64.0h
Chemical fertilizer + Cow manure	0	117b	98.0ab	26.7a	86.0b	90.5f
	100	117b	98.6a	26.8a	90.5a	136b
	200	119a	98.9a	26.7a	90.9a	149a
	300	118ab	98.8a	26.5a	91.5a	143ab
Mean		112	97.7	25.7	73.6	105
F-test ^{2/}						
Fertilizer		*	*	**	**	**
Silicon		**	**	*	**	**
Fertilizer x Silicon		*	*	*	**	**
CV (%)		1.6	0.4	1.2	2.7	4.8

^{1/}Means in the column with the same letter(s) are significantly different at $P < 0.05$ by Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

^{2/}** , * = significantly different at $P \leq 0.01$ and at $P \leq 0.05$, respectively

^{3/}ความชื้น 20 เปอร์เซนต์ ^{4/}เมล็ดข้าว

ความเข้มข้นของธาตุอาหารในพืช

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารในต้นข้าวพบว่า ชนิดของปุ๋ยและซิลิกอนมีผลต่อปริมาณธาตุอาหารพืชในต้นข้าวอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ต้นข้าวมีปริมาณไนโตรเจนอยู่ในช่วง 2.42–3.27 ก./กก. ปริมาณฟอสฟอรัส 1.16–1.66 ก./กก. ปริมาณโพแทสเซียม 17.0–30.3 ก./กก. ปริมาณแคลเซียม 2.50–4.46 ก./กก. และปริมาณซิลิกอน 11.1–110 ก./กก. โดยได้รับการทดลองที่ใส่มูลวัวเพียงอย่างเดียวและไม่ใส่ซิลิกอน ข้าวมีปริมาณธาตุอาหารทุกตัวต่ำที่สุดในขณะที่ได้รับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีและมูลวัวร่วมกับซิลิกอนในอัตรา 300 มก./กก. ข้าวมีปริมาณไนโตรเจน (3.27 ก./กก.) และปริมาณโพแทสเซียม (30.3 ก./กก.) สูงที่สุด และได้รับการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีและมูลวัวร่วมกับซิลิกอน อัตรา 200 มก./กก. ข้าวมีปริมาณฟอสฟอรัส (1.66 ก./กก.) ปริมาณแคลเซียม (4.46 ก./กก.) และปริมาณซิลิกอน (110 ก./กก.) สูงที่สุด (Table 4)

Table 4 Nutrient concentration in rice straw under different fertilizer additions

Treatment	Silicon	Nutrient concentration in rice straw (g/kg)				
		Nitrogen	Phosphorus	Potassium	Calcium	Silicon
Chemical fertilizer	0	2.58g ^{1/}	1.25i	17.2fg	3.40de	32.0e
	100	2.58g	1.43f	18.2fg	3.13ef	40.1d
	200	3.06c	1.40g	25.1cd	3.80bcd	44.0d
	300	2.72f	1.55d	26.8bc	3.83bc	58.2c
Cow manure	0	2.42h	1.16j	17.0g	2.50g	11.1g
	100	2.83e	1.49e	26.1bc	2.73fg	12.0g
	200	3.05c	1.62b	19.8ef	2.50g	21.0f
	300	3.07bc	1.47e	21.8e	2.80eg	58.0c
Chemical fertilizer + Cow manure	0	2.68f	1.34h	22.5de	3.43cde	21.1f
	100	2.88d	1.37g	27.6abc	4.00b	21.7f
	200	3.11b	1.66a	28.0ab	4.46a	110a
	300	3.27a	1.58c	30.3a	3.60bcd	89.3b
Mean		2.85	1.44	23.34	3.35	43.2
F-test ^{2/}						
Fertilizer		**	**	**	**	**
Silicon		**	**	**	**	**
Fertilizer x Silicon		**	**	**	**	**
CV (%)		0.9	1.1	6.9	7.4	8.9

^{1/}Means in the column with the same letter(s) are significantly different at $P < 0.05$ by Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

^{2/}** = significantly different at $P \leq 0.01$, respectively

ปริมาณการดูดใช้ธาตุอาหาร

ผลการวิเคราะห์ปริมาณการดูดใช้ธาตุอาหารในต้นข้าวพบว่า ชนิดของปุ๋ยและซิลิคอนมีผลต่อปริมาณธาตุอาหารพืชในต้นข้าวอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ต้นข้าวมีปริมาณการดูดใช้ในโตรเจนอยู่ในช่วง 20.2-58.1 มก./กระถาง ปริมาณฟอสฟอรัส 9.7-28.1 มก./กระถาง ปริมาณโพแทสเซียม 170-302 มก./กระถาง ปริมาณแคลเซียม 20.8-73.3 มก./กระถาง และปริมาณซิลิคอน 92.2-1813 มก./กระถาง โดยทำการทดลองที่ใส่มูลวัวเพียงอย่างเดียวและไม่ใส่ซิลิคอน ข้าวมีปริมาณธาตุอาหารทุกตัวต่ำที่สุดในขณะที่ในการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีและมูลวัวร่วมกับซิลิคอนในอัตรา 300 มก./กก. ข้าวมีปริมาณไนโตรเจน (58.1 มก./กระถาง) ปริมาณฟอสฟอรัส (28.1 มก./กระถาง) และปริมาณโพแทสเซียม (302 มก./กระถาง) สูงสุด และทำการทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีและมูลวัวร่วมกับซิลิคอน อัตรา 200 มก./กก. ข้าวมีปริมาณแคลเซียม (73.3 มก./กระถาง) และปริมาณซิลิคอน (1813 มก./กระถาง) สูงสุด (Table 5)

Table 5 Nutrient uptake in rice straw under different fertilizer additions

Treatment	Silicon	Nutrition uptake in rice straw (mg/pot)				
		Nitrogen	Phosphorus	Potassium	Calcium	Silicon
Chemical fertilizer	0	26.7k ^{1L}	13.0j	172i	35.1h	330g
	100	33.9g	18.8f	182h	42.1f	526f
	200	43.8d	20.1e	251d	54.5e	630e
	300	41.1e	23.4c	263c	57.9d	878c
Cow manure	0	20.2l	9.7k	170i	20.8k	92.2j
	100	27.3j	14.4i	261c	26.4j	115i
	200	32.0h	17.0gh	198g	26.2j	220h
	300	37.3f	17.9g	218f	34.0i	705d
Chemical fertilizer + Cow manure	0	28.3i	14.2i	225e	36.1g	222h
	100	45.0c	21.5d	276ab	62.5c	339g
	200	51.0b	27.2b	280b	73.3a	1813a
	300	58.1a	28.1a	302a	64.0b	1586b
Mean		37.1	18.8	237	44.4	621
F-test ^{2L}						
Fertilizer		**	**	**	**	**
Silicon		**	**	**	**	**
Fertilizer x Silicon		**	**	**	**	**
CV (%)		4.6	4.0	8.5	7.9	11.0

^{1L}Means in the column with the same letter(s) are significantly different at $P < 0.05$ by Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

^{2L}**= significantly different at $P \leq 0.01$, respectively

วิจารณ์

จากผลการทดลองพบว่า ชนิดของปุ๋ยและปริมาณซิลิคอนในอัตรา 200 และ 300 มก./กก. ส่งผลต่อการเจริญเติบโตผลผลิตของข้าวพันธุ์ กข6 ทั้งความสูงและการแตกกอ โดยปริมาณซิลิคอนมีผลต่อการแตกกอมากกว่าการไม่ใส่ซิลิคอน สอดคล้องกับ Jugul et al. (2015) ได้ศึกษาการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว จำนวน 3 ตำรับการทดลอง โดยใช้อัตราซิลิคอน คือ 0, 100, 200 และ 300 มก./กก. จากปุ๋ยแคลเซียมซิลิเกต ร่วมกับ ไนโตรเจน (Urea) อัตรา 100 กก./ไร่ และ ฟอสฟอรัส (P_2O_5) 50 กก./ไร่ พบว่าการใช้ซิลิคอนอัตรา 200 มก./กก. มีการเพิ่มผลผลิต อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ รวมทั้งความสูงของข้าว จำนวนการแตกกอ น้ำหนักจำนวน 1,000 เมล็ดสูงสุด

ผลการวิเคราะห์คุณภาพผลผลิต พบว่า ชนิดของปุ๋ยและปริมาณซิลิคอนในอัตรา 200 และ 300 มก./กก. มีผลต่อคุณภาพผลผลิต ได้แก่ จำนวนเมล็ดดีต่อรวง และน้ำหนักเมล็ดดี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ Phommuangkhuk et al. (2020) ที่พบว่า ในการเติมซิลิคอนอัตรา 500 มก./กก. จากปุ๋ยแคลเซียมซิลิเกต มีผลทำให้เมล็ดข้าวเพิ่มข้าว และปริมาณการดูดใช้ธาตุอาหารในต้นข้าวเพิ่มขึ้น และ Cuong et al. (2017) ได้ศึกษาอิทธิพลของซิลิคอนต่อการเจริญเติบโต และผลผลิตของข้าวในประเทศเวียดนาม พบว่า การใส่

ปุ๋ยเคมี ร่วมกับซิลิโคน ในอัตรา 200 และ 300 kg/hm² ทำให้ผลผลิตและคุณภาพผลผลิตเพิ่มขึ้น Ghanbari et al. (2011) และ Hassanein et al. (2018) รายงานว่าการใช้ซิลิโคนทำให้จำนวนช่อดอกเพิ่มขึ้น จำนวนรวงต่อต้นเพิ่มขึ้นและผลผลิตเพิ่มขึ้นสูงกว่าข้าวที่ไม่ได้ใส่ซิลิโคน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารในต้นข้าว และ ปริมาณธาตุอาหารที่พืชดูดใช้ พบว่าชนิดของปุ๋ยและปริมาณซิลิโคนในอัตรา 200 และ 300 มก./กก. มีผลต่อปริมาณการดูดใช้ธาตุอาหารของพืช ทำให้ธาตุอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และซิลิโคนเพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สอดคล้องกับ Ahmad et al. (2013) ได้ศึกษาผลของการใช้ซิลิโคนทางใบต่อผลผลิตและคุณภาพของข้าว พบว่า การใส่สารละลายซิลิโคนที่ 0.5% และ 1% ช่วยทำให้ปริมาณอาหารในฟางข้าวเพิ่มขึ้น และปริมาณธาตุอาหารหลักเพิ่มขึ้นมากกว่าที่ไม่ใส่สารละลายซิลิโคน

จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การใส่ซิลิโคนร่วมกับปุ๋ยให้กับข้าวที่ปลูกบนดินทราย สามารถช่วยส่งเสริมให้ผลผลิตของข้าวเพิ่มขึ้น องค์ประกอบผลผลิตของข้าว แตกต่างจากไม่ใส่ซิลิโคน ทั้งนี้เนื่องจากซิลิโคนจัดอยู่ในกลุ่มธาตุเสริมประโยชน์ ดังนั้น การใส่ปุ๋ยซิลิโคนทั้ง 2 อัตรา คือ 200 และ 300 มก./กก. ช่วยให้การเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ จุฑารัตน์ (2546) ที่ใส่ซิลิโคนในอัตราที่เพิ่มขึ้นร่วมกับปุ๋ย ทำให้คุณภาพของข้าวดี เปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบลดลง จำนวนรวงและจำนวนเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อผลผลิตข้าวที่เพิ่มขึ้น มีน้ำหนักฟางข้าว และน้ำหนักแห้งทั้งหมดสูง ทำให้ผลผลิตเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดมากกว่าข้าวที่ไม่ได้รับการใส่ซิลิโคน การใส่ซิลิโคนอัตรา 200 และ 300 มก./กก. ร่วมกับปุ๋ยเคมีและมูลวัว ช่วยให้ต้นข้าวตั้งตรง ข้าวไม่หักล้ม ข้าวเจริญเติบโตได้ดีแตกกอมาก ดังนั้นข้าวจึงต้องการซิลิโคนในช่วงระยะการเจริญเติบโต (ยางยุทธ, 2552)

สรุป

จากการทดลองการใส่ซิลิโคนร่วมกับปุ๋ยเคมีและมูลวัว ในการปลูกข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 ที่ปลูกบนดินทราย ในชุดดินน้ำพอง พบว่าข้าวที่ใส่ซิลิโคนมีแนวโน้มการเจริญเติบโตของข้าวดีกว่าที่ไม่ได้ใส่ซิลิโคน การใช้ปุ๋ยมูลวัวร่วมกับปุ๋ยเคมีช่วยให้ข้าวได้ผลผลิตเพิ่มขึ้น โดยการใส่ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยมูลวัวร่วมกับปุ๋ยซิลิโคน ในอัตรา 200 และ 300 มก./กก. ช่วยให้ข้าวดูดใช้ธาตุอาหารได้สูงขึ้น ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพผลผลิตที่เพิ่มขึ้น ทั้งด้านความสูง การแตกกอ จำนวนเมล็ดดีต่อรวง น้ำหนักเมล็ดข้าวสูงขึ้น และปริมาณผลผลิต

เอกสารอ้างอิง

- กรมการข้าว. 2560. ข้าว: เทคโนโลยีการปลูกข้าว และการจัดการหลังการเก็บเกี่ยว. กรุงเทพฯ: สำนักส่งเสริมการผลิตข้าวกรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2550. ความสำคัญของดินและปุ๋ย. กรุงเทพฯ: สำนักสำรวจและวิจัยทรัพยากรดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2560. ลักษณะและสมบัติของดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. กรุงเทพฯ: สำนักสำรวจและวิจัยทรัพยากรดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- จุฑารัตน์ คำนิงกิจ. 2546. ผลของซิลิโคนที่มีต่อผลผลิตและการดูดใช้ธาตุอาหารของข้าวและข้าวโพดที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัด ชุดดินองครักษ์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 94 น.
- นงคราญ มณีวรรณ, บุญดิษฐ์ วรินทร์รักษ์, ยงยุทธ โอสสุภา, วิศววรรณ ท้ายเมือง และสมศักดิ์ สุขจันทร์. 2558. ดิน ธาตุอาหารและปุ๋ยข้าว. กรุงเทพฯ: สมาคมดินและปุ๋ยแห่งประเทศไทย.
- พนิดา พลอดสันเทียะ, ศุภินา ธนะจิตต์, สมชัย อนุสนธิ์พรเพิ่ม และเอิบ เขียวรัตน์มย์. 2560. ผลของซิลิโคนและวัสดุปรับสภาพดินที่มีซิลิโคนสูงต่ออายุที่ปลูกบนชุดดินน้ำพอง. แก่นเกษตร. 45(1): 79-90.

- พรทิพย์ จันทร์บุตร. 2558. การใช้ประโยชน์ของปุ๋ยแคลเซียมซิลิเกตเพื่อส่งเสริมการเติบโตและผลผลิตของข้าวในระบบสารละลายธาตุอาหารพืช. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ยงยุทธ โอสธสภ. 2552. ธาตุอาหารพืช. พิมพ์ครั้งที่3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 529 น.
- สมชาย ชคตระการ และพัชร์เพ็ญ ภูมิพันธ์. 2560. ผลของการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 45(1): 66-74 น.
- สำราญ พิมพ์ราช, เหล็กไหล จันทะบุตร, พรพิชญ์ ธรรมปัทม และสุนันท์ บุตรศาสตร์. 2561. ผลของการฉีดพ่นกรดซิลิกิกต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และองค์ประกอบผลผลิตของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1. วารสารเกษตรพระวรุณ. 15(2): 363-371.
- Ahmad, A., M. Afzal, A.U.H. Ahmad, and Tahir. 2013. Effect of foliar application of silicon on yield and quality of rice (*Oryza sativa* L.). Cercetari Agronomice in Moldova. 46: 21-28.
- Black, C.A. 1965. Method of soil analysis part 2 Chemical and Microbiological Properties. USA: American Society of Agronomy.
- Bray, R.H., and N. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Science. 59: 39-45.
- 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: 283-290.
- Chapman, H.D., and P.F. Pratt .1978. Methods of Analysis for Soils, Plant and Waters. Division of Agricultural Sciences. University of California. U.S.A.
- Ghanbari-Malidarreh, A., S.V. Alavi, and S. Dastan. 2011. Effect of silicon and phosphorus rates on yield and yield components of rice (*Oryza sativa* L.). In Proceedings of the 5Th International Conference on Silicon in Agriculture. September 13-18, 2011. Beijing, China. (pp. 49-50).
- Hanan, S., M.R. Siam, S.H. Abd El-Moez, and S.T. Abou. 2017. Effect of silicon addition to different fertilizer on yield of rice (*Oryza sativa* L.) plants. I- Macro Nutrients by Different Rice Parts. Middle East Journal of Applied Sciences. 8: 177-190.
- Hassanein, M.S., G.A. Amal, and M.Z. Nabila. 2018. Effect of nitrogen fertilizer and bio-fertilizer on yield and yield components of two wheat cultivars under sandy soil. Middle East Journal of Applied Sciences. 8: 37-42.
- Hallmark, C.T., L.P. Wilding, and N.E. Smeck. 1982. Silicon. p. 263-271. In Page et al. (ed.). Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Agronomy 9. Madison, Wisconsin.
- Iqbal, A., I. Ali, P. Yuan, R. Khan, H. Liang, S. Wei, and L. Jiang. 2022. Combined application of manure and chemical fertilizers alters soil environmental variables and improves soil fungal community composition and rice grain yield. Frontiers in Microbiology. 13: 856355.
- Jackson, M.L. 1958. Soil Chemical Analysis. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 498 p.
- Jones, J.B., B. Wolf, and H.A. Mills. 1991. Plant Analysis Handbook. Georgia, USA: Micro-macro Publishing.
- Jugal, K. M., K. C. Patel, M. Sajid, and V.P. Ramani. 2015. Effect of silicon levels on growth, yield attributes and yield of rice in typic ustochrepts soils. Ecology, Environment and Conservation. 21(August Suppl.): AS205-AS208.
- Kovacs, S., E. Kutasy, and J. Csajbok. 2022. The multiple role of silicon nutrition in Alleviating Environmental Stresses in sustainable crop production. Plants Journal. <https://doi.org/10.3390/plants11091223>.

- Lamichhane, S, B.R. Khanal, A. Jaishi, S. Bhatta, R. Gautam, and J. Shrestha. 2022. Effect of integrated use of farmyard manure and chemical fertilizers on soil properties and productivity of rice in Chitwan. *Agronomy Journal of Nepal*. 6(1): 200-212.
- Ma, J.F., and E. Takahashi. 2002. *Soil, Fertilizer and Plant Silicon Research in Japan*. Elsevier, Amsterdam.
- Mengel, K., E.A. Kirkby, H. Kosegarten, and T. Appel. 2001. *Principles of Plant Nutrition*. 5th ed. Dordrecht: Kluwer Academic. 849p.
- Phommuangkhu, A., S. Amkha, Y. Osotsapar, and N. Udomprasert. 2020. Effects of Si application on growth, yield and Si concentration in rice under nutrient solution system. *Agricultural Science and Management Journal*. 3(2): 70-80.
- Tanaka, A., and S. Yoshida. 1975. *Nutritional Disorders of Rice Plant in Asia*. Philippines: International Rice Research Institute (IRRI).
- Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cation. In Page, A.L. (Ed.). *Method of soil analysis*. 2nd ed. p. 159-166. Madison, Wisconsin, U.S.A: Amer. Soc. Agron.