

ผลของการใช้แคลเซียมซิลิเกตร่วมกับการฉีดพ่นโพแทสเซียมซิลิเกตทางใบต่อผลผลิตและการดูดใช้ธาตุโพแทสเซียม แคลเซียม และซิลิคอนของข้าวที่ปลูกในชุดดินสระบุรี

Effect of Calcium Silicate and Potassium Silicate Foliar Application on Yield, Potassium,

Calcium and Silicon Uptake of Rice Planted in Saraburi Soil Series

สุทธาทิพย์ ทองคำปั้น¹ อัญธิชา พรมเมืองคุก^{1*} ศุภชัย อำคา¹ ณัฏชา ศรหิรัญ¹ และ
ธวัชชัย อินทร์บุญช่วย¹

Sutatip Thongkumpan¹, Aunthicha Phommuangkhu^{1*}, Suphachai Amkha¹, Natcha Sornhiran¹
and Tawatchai Inboonchuay¹

Received: November 11, 2024

Revised: November 21, 2024

Accepted: November 27, 2024

Abstract: Silicon (Si) is considered a beneficial element. Several evidences have indicated the positive effects of Si on rice yield by alleviating several abiotic and biotic stresses. However, in Thailand, findings about benefits of Si for rice production remain poorly understood, especially for low to medium level of available Si in soil. This study aimed to investigate the effect of calcium silicate application and potassium silicate foliar spray on yield and nutrient uptake of RD 85 rice variety in Saraburi soil series. The experiment was arranged in a randomized complete block design (RCBD) consisted of three replications and five treatments; control (T1), T2 was applied calcium silicate at the rate of 30 kg per rai (at 40 DAP), while the potassium silicate was sprayed at a rate of 2,000 mgSi per liter (at 60 DAP) in combination with a calcium silicate applied in T3, T4 and T5 (10, 20 and 30 kg per rai, respectively). The yield, yield components, total K, Ca, and Si content in different rice parts were analyzed at the harvest stage. The result revealed that the accumulation of Si was highest in the stem, followed by rice husk, leaf and brown rice, respectively. The application of Si resulted in plant uptake of K and Ca in above ground biomass higher than T1 and T2. In term of the application rates, T4 gave the highest yield, Si uptake in stem biomass and economic returns comparing with other treatments. Therefore, T4 is an appropriate rate to apply for Saraburi soil series, which contain soil available Si in medium level.

Keywords: Calcium silicate, Potassium silicate, Silicon, Silicon accumulation

บทคัดย่อ: ซิลิคอนถูกจัดเป็นธาตุเสริมประโยชน์ มีงานวิจัยที่รายงานถึงผลดีของซิลิคอนที่มีต่อข้าวในการบรรเทาความเครียดทั้งจากปัจจัยชีวและอชีว สำหรับประเทศไทยยังมีข้อมูลที่ได้จากงานทดลองในสภาพแปลงเมื่อมีการปลูกข้าวในดินซึ่งมีซิลิคอนที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลางอยู่น้อย จึงทำการทดลองในสภาพแปลง เพื่อศึกษาผลของแคลเซียมซิลิเกตร่วมกับการฉีดพ่นโพแทสเซียมซิลิเกตทางใบต่อผลผลิต และการดูดใช้ธาตุอาหารของข้าวพันธุ์ กข 85 ที่ปลูกในชุดดินสระบุรี วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณภายในบล็อก จำนวน 3 ซ้ำ

¹ ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

¹ Department of Soil Science, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140.

*Corresponding author: agracp@ku.ac.th

มี 5 ตำรับการทดลอง ได้แก่ ตำรับควบคุม (T1) ตำรับที่ 2 (T2) ใส่แคลเซียมซิลิเกตอัตรา 30 กิโลกรัมต่อไร่ ตำรับที่ 3 4 และ 5 (T3 T4 และ T5) ใส่แคลเซียมซิลิเกตอัตรา 10 20 และ 30 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ ที่อายุข้าว 40 วัน หลังหว่าน ร่วมกับการฉีดพ่นโพแทสเซียมซิลิเกตความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมซิลิคอนต่อลิตร ที่ข้าวอายุ 60 วัน หลังหว่าน เก็บข้อมูลผลผลิต องค์ประกอบผลผลิต และวิเคราะห์ปริมาณธาตุโพแทสเซียม แคลเซียม และซิลิคอน ทั้งหมดในส่วนต่าง ๆ ของข้าวที่ระยะเก็บเกี่ยว ผลการทดลองพบว่าธาตุซิลิคอนมีการสะสมในลำต้นมากที่สุด รองลงมาคือ แกลบ ใบ และเมล็ดข้าวกล้อง การใส่ซิลิคอนมีผลให้การดูดใช้โพแทสเซียม และแคลเซียมในส่วนเหนือดินมากกว่าตำรับควบคุมและตำรับการทดลองที่ 2 สำหรับอัตราที่ใส่พบว่าการใช้ซิลิคอนในตำรับการทดลองที่ 4 ให้ผลผลิต และการดูดใช้ซิลิคอนในลำต้นสูงที่สุด รวมทั้งมีผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสูงกว่าเมื่อเทียบกับตำรับการทดลองอื่น ดังนั้น ตำรับการทดลองที่ 4 จึงเหมาะสมกับการใช้ในชุดดินสระบุรีที่มีระดับของซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ในดินในระดับปานกลาง

คำสำคัญ: แคลเซียมซิลิเกต, โพแทสเซียมซิลิเกต, ซิลิคอน, การสะสมซิลิคอน

คำนำ

ซิลิคอน (Si) เป็นธาตุที่มีในชั้นผิวโลกมากเป็นอันดับสอง แต่ส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบของแร่ซิลิเกตและซิลิเกต ดังนั้นในสารละลายดินจึงมีเพียงเล็กน้อย รากพืชดูดใช้ในรูปของกรดซิลิสิก (H_4SiO_4) พืชทุกชนิดที่เจริญเติบโตในดินจะมีซิลิคอนอยู่ในเนื้อเยื่อเสมอแต่ความเข้มข้นจะแตกต่างกันไป ในบรรดาพืชชั้นสูงที่ดูดใช้ซิลิคอน พบว่าข้าวเป็นพืชที่สะสมซิลิคอนสูง มีซิลิกาในเนื้อเยื่อพืชแห้งประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ บทบาทของซิลิคอนที่มีต่อการเจริญเติบโตของข้าว มี 4 ประการ คือ 1) เป็นองค์ประกอบในผนังเซลล์ 2) ผลต่อผนังเซลล์และเมแทบอลิซึม 3) บรรเทาความเครียดจากปัจจัยชีวและ เช่น ปฏิกิริยาพิษจากการเข้าทำลายของโรคแมลงศัตรูพืช และชีวและ เช่น ความแล้ง ความร้อน ความเค็ม ลดพิษจากธาตุโลหะในดิน และ 4) ผลต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิต (Epstein, 1999; Guntzer *et al.*, 2012; Ma and Takahashi, 2002; Tubana *et al.*, 2016) การวิจัยเกี่ยวกับธาตุนี้ในประเทศญี่ปุ่นมีความก้าวหน้ามาก จนนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีที่สมบูรณ์เรื่องการใช้ปุ๋ยซิลิคอนในนาข้าว ซิลิคอนมีการสะสมอยู่ที่ชั้นเอพิเดอร์มิสในใบข้าว ลำต้น และแกลบในรูปของซิลิกาอสัณฐาน และเคลื่อนที่มาสู่ส่วนเหนือดินตามแรงดึงดูดการคายน้ำ (Farooq and Dietz, 2015; Ma *et*

al., 2011; Pontigo *et al.*, 2015; Yoshida, 1965) Ando *et al.* (2002) พบว่า การใส่ปุ๋ยซิลิคอนในนาข้าวอัตรา 50-180 กรัมซิลิคอนต่อตารางเมตร มีประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงสูงกว่าข้าวที่ไม่ได้รับซิลิคอน ทั้งในระยะข้าวแตกกอสูงสุด และในระยะข้าวตั้งท้อง

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยและเป็นอาหารหลักของประชากรโลกกว่าสามพันล้านคน โดยเฉพาะเอเชีย แอฟริกา และอเมริกาใต้ (ยงยุทธ และคณะ, 2558) ดังนั้น ภายใต้หลักการพื้นฐานของการผลิตพืช หากมีการจัดการองค์ประกอบหลัก (genetics x environment x management = yield + quality) ให้เหมาะสม ล้วนส่งผลต่อการผลิตอาหารเลี้ยงประชากรโลกทั้งสิ้น Klotzucher *et al.* (2015) ทำการทดลองภายใต้โครงการ LEGATO รายงานว่าธาตุซิลิคอนเป็นกุญแจสำคัญที่ทำให้การผลิตข้าวในพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีความยั่งยืน ประเทศไทยได้นำซิลิคอนมาใช้ในการเกษตร เช่น โพแทสเซียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต โซเดียมซิลิเกต และกรดซิลิสิก แต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของสารประกอบ จึงมีคำแนะนำอัตราการใช้ที่หลากหลาย สิปปวิชญ์ (2559) รายงานว่า การใส่แคลเซียมซิลิเกตในดินที่มีซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ได้สูง

ปานกลาง และต่ำ (ปริมาณซิลิคอนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จะแนะนำการใช้ที่อัตรา 0 5 และ 10 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ ซึ่งให้ผลผลิตไม่แตกต่างกับการใช้ที่อัตรา 20 กิโลกรัมต่อไร่ ขณะที่ ชนิกันต์ (2557) พบว่า การใช้วัสดุเหลือใช้แคลเซียมซิลิเกต อัตรา 320 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักเมล็ดตอสูงขึ้น แต่ไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ที่อัตรา 160 กิโลกรัมต่อไร่ Chen *et al.* (2011) และ Ma *et al.* (2011) รายงานว่า แปลงข้าวที่มีการคายน้ำน้อย พบการเคลื่อนที่ของซิลิคอนมาสู่ส่วนเหนือดินน้อยลงด้วย ส่วนแปลงที่ฉีดพ่นซิลิคอนทางใบในระยะกำเนิดช่อดอกจะทำให้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำแคลเซียมซิลิเกตร่วมกับการฉีดพ่นโพแทสเซียมซิลิเกตมาใช้เป็นแหล่งของซิลิคอนเพื่อเพิ่มผลผลิตข้าวในดินที่มีค่าการประเมินความเป็นประโยชน์ของซิลิคอนระดับปานกลาง โดยอ้างอิงงานทดลองของ ชนิกันต์ (2557) และ สิปปวิทย์ (2559) ในการกำหนดอัตราที่ใช้ ดังนั้น การวิจัยนี้จึงมีประโยชน์อย่างมากในแง่ของการเลือกใช้อัตราของแคลเซียมซิลิเกตและโพแทสเซียมซิลิเกตในนาข้าวให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

ใช้แคลเซียมซิลิเกตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางการค้า (Calcium silicate; Ca_2SiO_3 ประกอบด้วย CaO : 43 และ SiO_2 : 23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก; %wt) และโพแทสเซียมซิลิเกต (Potassium silicate; K_2SiO_3 ประกอบด้วย SiO_2 : 27.30 และ K_2O : 13.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก; %w/w สารนี้เป็นของเหลวที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.4) เป็นแหล่งของซิลิคอนวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (Randomized Complete Block Design; RCBD) จำนวน 3 ซ้ำ มี 5 ตำรับการทดลอง ได้แก่ ตำรับควบคุมตำรับที่ 2 ใส่แคลเซียมซิลิเกตอัตรา 30 กิโลกรัมต่อไร่ ส่วนตำรับที่ 3 4 และ 5 ใส่แคลเซียมซิลิเกตอัตรา 10 20 และ 30 กิโลกรัมต่อไร่ (1.07 2.15 และ 3.22 กิโลกรัมซิลิคอนต่อไร่ ตามลำดับ) ร่วมกับการฉีดพ่นโพแทสเซียมซิลิเกตที่ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมซิลิคอนต่อลิตร (29.14 กิโลกรัมซิลิคอนต่อไร่)

ทดลองในสภาพแปลงตั้งแต่ปี พ.ศ. 2566-2567 ณ ตำบลวังหว้า อำเภอศรีประจันต์ จังหวัดสุพรรณบุรี ($14^{\circ}40'06.8''\text{N}$ $100^{\circ}05'31.6''\text{E}$) ซึ่งเป็นชุดดินสระบุรี (Saraburi series: Very-fine, mixed, active, nonacid, isohyperthermic Vertic (Aeric) Endoaquepts) เก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มกระจายทั่วทั้งแปลงเพื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติดินพื้นฐานก่อนการทดลอง โดยค่าพีเอชดิน (ทัศนีย์ และจรงค์, 2542) มีความเป็นกรดเล็กน้อย (6.12) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Walkley and Black, 1934) อยู่ในระดับสูง คือ 36.2 กรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ อยู่ในระดับสูง มีค่าเท่ากับ 1,684.65 และ 447.50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ มีปริมาณเหล็ก แมงกานีส และทองแดงที่สกัดได้อยู่ในระดับสูงมาก (196.76, 73.61 และ 7.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) ส่วนปริมาณสังกะสีที่สกัดได้อยู่ในระดับสูง คือ 4.93 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ อยู่ในระดับสูงมาก มีค่า 49.12 และ 143.64 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ทัศนีย์ และจรงค์, 2542; Bray and Kurtz, 1945) ขณะที่ปริมาณซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ อยู่ในระดับปานกลาง มีค่าเท่ากับ 70.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยอ้างอิงเกณฑ์ประเมินความพอเพียงของซิลิคอนกับข้าวจาก Imaizumi and Yoshida (1958) ซึ่งสกัดดินด้วยโซเดียมอะซีเตทบัฟเฟอร์ที่พีเอช 4.0 (กรมวิชาการเกษตร, 2544; Hallmark *et al.*, 1982; Imaizumi and Yoshida, 1958)

จากผลทดสอบดิน สามารถกำหนดอัตราปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมที่ใส่ตามค่าวิเคราะห์ดินกับข้าวไม่ไวแสงได้เท่ากับ 6-0-0 กิโลกรัมของ $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ ต่อไร่ (กรมวิชาการเกษตร, 2548) โดยทุกตำรับจะได้รับปุ๋ยธาตุหลักอัตราเดียวกันตลอดการทดลอง ไถเตรียมดินและทำคันนาเพื่อแบ่งเป็นแปลงย่อยขนาด 5x5 ตารางเมตร ส่วนคันนามีความสูง 30 เซนติเมตร กว้าง 20 เซนติเมตร จากนั้นแช่เมล็ดข้าวพันธุ์ กข 85 ในน้ำกลั่น เป็นเวลา 1 คืน นำมาบ่มด้วยผ้าขาวบางที่ชุ่มด้วยน้ำเป็นเวลา 2 คืน ก่อนนำเมล็ดไปหว่านลงในแปลง ใช้เมล็ดพันธุ์

อัตรา 20 กิโลกรัมต่อไร่ ใส่ปุ๋ยรองพื้นสูตร 46-0-0 อัตรา 3 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อข้าวมีอายุ 21 วันหลังหว่าน และเมื่อข้าวเข้าสู่ระยะการแตกกอสูงสุด คือที่อายุ 40 วัน จะใส่ปุ๋ยแต่งหน้าสูตร 46-0-0 อัตรา 3 กิโลกรัมต่อไร่ พร้อมกับแคลเซียมซิลิเกตตามอัตราที่กำหนด ในแต่ละครั้งทดลอง ส่วนการฉีดพ่นโพแทสเซียมซิลิเกต จะทำเมื่อข้าวมีอายุ 60 วันหลังหว่าน ในด้านการทดลอง ที่ 3 4 และ 5 ที่ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมซิลิคอนต่อลิตร เปรียบโดยละลายโพแทสเซียมซิลิเกต จำนวน 5.34 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น 1,000 มิลลิกรัม สำหรับปริมาตรที่ใช้ฉีดพ่นในพื้นที่ 25 ตารางเมตร คือ 320 มิลลิกรัม เทียบเท่ากับอัตราการฉีดพ่น 20.5 ลิตรต่อไร่ การปฏิบัติดูแลรักษาอื่นๆ เช่น การให้น้ำ การกำจัดโรคและแมลง เป็นไปตามวิธีปฏิบัติของเกษตรกรจนกระทั่งเก็บเกี่ยว

เก็บเกี่ยวข้าวทั้งแปลงที่อายุ 120 วัน จากนั้นบันทึกน้ำหนักผลผลิต ส่วนข้อมูลองค์ประกอบผลผลิต สุ่มเก็บจากพื้นที่ 1x1 ตารางเมตร แยกส่วนใบ ลำต้น เมล็ดข้าวกล้อง และแกลบนำส่วนต่างๆ ไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกเป็นน้ำหนักมวลชีวภาพแห้ง นำตัวอย่างที่ผ่านการอบไปบดด้วยเครื่องบดตัวอย่างพืช เพื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารในส่วนต่างๆ ของข้าว ได้แก่ ปริมาณโพแทสเซียมและแคลเซียมทั้งหมด (ทัศนีย์ และจรัส, 2542) สำหรับปริมาณซิลิคอนทั้งหมด ทำโดยนำตัวอย่างพืชไปย่อยด้วยเครื่อง microwave digester จำนวน 2 รอบ รอบแรกจะใช้โปรแกรม straw method with hydrofluoric acid; HF (10 มิลลิกรัมของ HNO_3 + 1 มิลลิกรัมของ HF) และรอบที่ 2 จะสะเทิน HF โดยใช้โปรแกรม boric acid HF neutralization (ใช้ 4 เปอร์เซ็นต์ของสารละลายกรดบอริก จำนวน 10 มิลลิกรัม) ปรับปริมาตรและเก็บสารละลายที่ได้ในขวดพลาสติก แล้ววัดปริมาณซิลิคอนด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma (ICP-OES) (ดัดแปลงจาก Jones and Dreher, 1996; Saito *et al.*, 2005) คำนวณการดูดใช้ธาตุอาหารในส่วนต่างๆ และส่วนเนื้อดินทั้งหมด คำนวณดัชนีการเก็บเกี่ยวซิลิคอน (silicon harvest index; SHI) จาก $\text{SHI} = \left[\frac{\text{การดูดใช้}}$

ซิลิคอนในเมล็ด(การดูดใช้ซิลิคอนในเมล็ด+การดูดใช้ซิลิคอนในลำต้น)] และคำนวณการกระจายของธาตุซิลิคอนในส่วนต่าง ๆ ของข้าวจาก [(ผลรวมการดูดใช้ซิลิคอนในส่วนต่าง ๆ จากทุกตำรับx100)/การดูดใช้ในส่วนเนื้อดินทั้งหมดจากทุกตำรับทดลอง] กำหนดให้การดูดใช้ในส่วนเนื้อดินทั้งหมดจากทุกตำรับทดลองเป็นค่าสูงสุด (Fageria, 2014)

คำนวณต้นทุนการผลิต (บาทต่อไร่) จาก ต้นทุนการปลูกข้าว (บาทต่อไร่) + ต้นทุนการใส่ซิลิคอน (บาทต่อไร่)

คำนวณรายได้ จากผลผลิต (ตันต่อไร่) x ราคาข้าวเปลือก (บาทต่อตัน)

คำนวณกำไรสุทธิ จาก รายได้ - ต้นทุน

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป IBM SPSS Statistics เวอร์ชัน 26 ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองและวิจารณ์

องค์ประกอบผลผลิต ผลผลิต และมวลชีวภาพแห้งในส่วนต่างๆ ของข้าว

ระดับของซิลิคอนที่ใส่มีผลทำให้องค์ประกอบผลผลิตของข้าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ยกเว้นน้ำหนักเมล็ดดิบโดยผ่านการทดลองที่ 4 ให้น้ำหนัก 100 เมล็ด และน้ำหนักเมล็ดดี สูงที่สุด คือ 3.33 กรัม และ 3.48 กรัม ต่อรวง ตามลำดับ ขณะที่ตำรับควบคุม ให้น้ำหนัก 100 เมล็ด และน้ำหนักเมล็ดดีน้อยที่สุด คือ 3.00 กรัม และ 2.97 กรัมต่อรวง ตามลำดับ ระดับของซิลิคอนที่ใส่ไม่มีผลทำให้น้ำหนักเมล็ดดิบระหว่างตำรับทดลองแตกต่างกันทางสถิติ แต่มีแนวโน้มว่าการใส่ซิลิคอนทางดินร่วมกับการฉีดพ่นทางใบ จะมีน้ำหนักเมล็ดดิบน้อยกว่าการไม่ใส่ซิลิคอน (Figure 1) จากการทดลองของ Rupasinghe *et al.* (2022) ศึกษาการใส่ซิลิคอนทางดินในอัตราต่างๆ ได้แก่ 0 50 75 100 125 และ 150 กิโลกรัมซิลิกาต่อเฮกตาร์ ต่อการผลิตข้าวพันธุ์ Bw 367 ในประเทศมาเลเซีย พบว่า การใส่ซิลิคอนอัตรา 100 กิโลกรัมซิลิกาต่อเฮกตาร์ ทำให้

น้ำหนักเมล็ดมีค่าสูงขึ้น 51 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่น้ำหนักเมล็ดลดลงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับตำรับที่ไม่ใส่ นอกจากนี้ยังให้น้ำหนัก 1,000 เมล็ดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราอื่น ยงยุทธ และคณะ (2558) กล่าวว่า การเจริญเติบโตของข้าวในวัฏภาคเต็มเต็มเมล็ดหรือระยะเติบโตด้านการสุกแก่ (spikelet filling phase) เป็นระยะที่กำหนดขนาดและน้ำหนักเมล็ด เนื่องจากการเคลื่อนย้ายคาร์โบไฮเดรตจากใบและต้นมาสะสม ทำให้เมล็ดโตขึ้นจนมีสภาพสุกแก่เชิงสรีระ ซึ่งการสังเคราะห์แสงของใบข้าวในระยะนี้มีความสำคัญต่อการเพิ่มน้ำหนักเมล็ดข้าวเป็นอย่างมาก Ando *et al.* (2002) พบว่า ธาตุซิลิคอนจะเพิ่มความแข็งแรงของผนังเซลล์ที่ใบและลำต้นโดยเชื่อมโยงชั้นของซิลิกากับเซลลูโลส ทำให้โครงสร้างทรงพุ่มของต้นข้าวดีขึ้น การใส่ซิลิคอนในระยะการเจริญเติบโตด้านลำต้น และเจริญพันธุ์จึงสัมพันธ์กับผลผลิตข้าว เมื่อความเข้มแสงสัมพันธ์ในทรงพุ่มส่วนบนสูงกว่าต้นข้าวที่ไม่ได้รับปุ๋ยซิลิคอนทั้งในระยะแตกกอสูงสุดและระยะข้าวตั้งท้อง ดังนั้น เมื่อข้าวมีการสังเคราะห์แสงที่มีประสิทธิภาพ จึงมีส่วนสำคัญในการเพิ่มน้ำหนักและผลผลิตเมล็ด สอดคล้อง

กับ Fujii *et al.* (1999) ที่รายงานว่า ซิลิคอนช่วยให้ใบข้าวมีองศาที่ตั้งชัน (erect degree of leaf blades) พื้นที่ใบในการรับแสงมากขึ้น ทำให้การสังเคราะห์แสงของข้าวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ การศึกษาผลของซิลิคอนที่มีต่อการผลิตข้าวของ Inanaga *et al.* (2002) พบว่า การใส่ซิลิคอน มีน้ำหนักและจำนวนเมล็ดต่อรวงลดลง ตรงข้ามกับเมล็ดดีที่มีน้ำหนักและจำนวนเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาของ Hossain and Miyagawa (2001) สรุปว่าข้าวที่มีการใส่ซิลิคอนสามารถทำให้จำนวนรวง จำนวนเมล็ดต่อต้น และน้ำหนัก 1000 เมล็ดเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ไม่ใส่ซิลิคอน นอกจากนี้ Chen *et al.* (2011) รายงานว่าเนื่องจากซิลิคอนมีบทบาทต่อการสังเคราะห์แสงของพืช หากพืชอยู่ภายใต้สภาวะแห้งแล้ง ธาตุซิลิคอนมีบทบาททางอ้อมในการควบคุมการเปิดปิดของปากใบ และส่งเสริมการผลิตเม็ดสี (pigment) ซึ่งมีความจำเป็นต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช จากเหตุผลดังกล่าว จึงสามารถช่วยให้ข้าวมีการเจริญเติบโตเป็นปกติและส่งเสริมให้องค์ประกอบผลผลิตเพิ่มสูงขึ้น

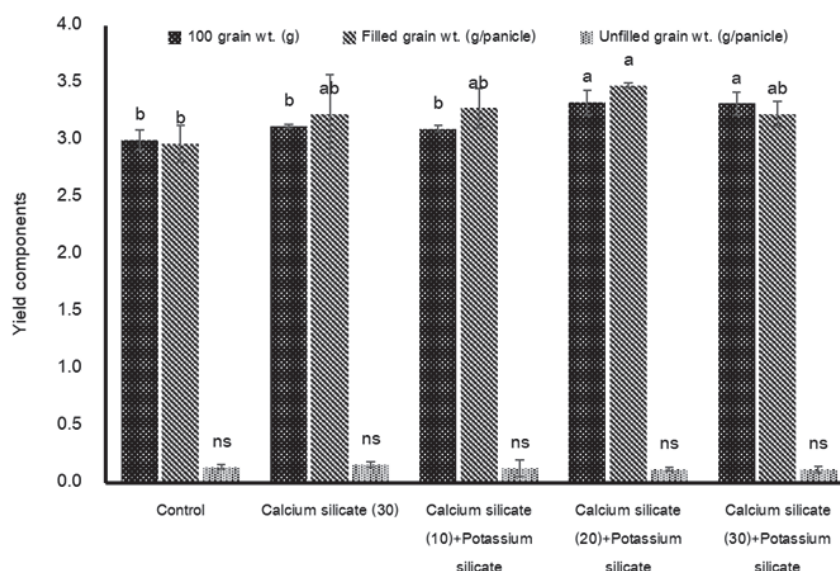


Figure 1 Effect of Si application on yield component of rice cv. RD 85. The mean values for bars with the same letter above them are not significantly different ($p < 0.05$) using DMRT, while "ns" reveals in unfilled grain weight. Error bars are standard error of the mean ($n=3$).

ในแง่ของผลผลิตพบว่า การได้รับการทดลองที่ 4 ให้ผลผลิตสูงสุดที่สุด คือ 572.07 กิโลกรัมต่อไร่ ($P < 0.05$) สอดคล้องกับน้ำหนัก 100 เมล็ด และน้ำหนักเมล็ดดีที่มีค่าสูงสุดในตำรับดังกล่าวเช่นกัน ขณะเดียวกันก็ให้น้ำหนักเมล็ดลีบน้อยที่สุดด้วย ขณะที่การควบคุมให้ผลผลิตน้อยที่สุด คือ 509.99 กิโลกรัมต่อไร่ (Figure 2) จากผลการทดลองของ Lavinsky *et al.* (2016) รายงานว่า การใส่กรดโมโนซิลิกที่เตรียมจากโพแทสเซียมซิลิเกตโดยใช้ cation-exchange resin ให้กับข้าวในทุกระยะการเจริญเติบโต ทำให้ความเข้มข้นของซิลิคอนในช่อดอก ใบธง และข้าวเปลือกเพิ่มสูงขึ้น ส่วนการใส่ซิลิคอนที่ระยะกำเนิดช่อดอกจนถึงระยะท้องแก่ (60-90 วันหลังปลูก) ทำให้จำนวนเมล็ดต่อรวง และจำนวนเมล็ดต่อต้นเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 49 และ 77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับน้ำหนักเมล็ดดีและน้ำหนัก 1,000 เมล็ดที่มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับการไม่ใส่ซิลิคอนที่ระยะดังกล่าว นอกจากนี้ ยังพบการแสดงออกของโปรตีนพาหะ Lsi6 ที่ระยะกำเนิดช่อดอกจนถึงท้องแก่มากกว่าระยะสุกแก่ ซึ่งโปรตีนพาหะ Lsi6 จะเกี่ยวข้องกับการดูดซิลิคอนจากภายนอกเข้ามาภายในรากข้าว Kato and Owa (1997) ศึกษาการตอบสนองของข้าวที่ระยะต่างๆ ต่อการได้รับซิลิคอนที่อัตราต่ำ กลาง และสูง ทำการทดลองในดินนาของประเทศญี่ปุ่น (National Institute of Agro-Environmental Sciences) พบว่า ข้าวดูดธาตุซิลิคอนไปใช้ตั้งแต่การเจริญเติบโตในระยะแตกกอเป็นต้นไป แต่ระยะที่เหมาะสมต่อการใส่ซิลิคอนจะเป็นระยะเจริญพันธุ์ ซึ่งระยะนี้จะมีผลต่อการเพิ่มน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินและผลผลิตของข้าว ส่วน Korndörfer *et al.* (2001) รายงานว่า ผลผลิตข้าวที่เพิ่มขึ้นจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นและการดูดใช้ซิลิคอนในตอซังข้าว

การใส่ซิลิคอนมีผลทำให้มวลชีวภาพแห้งในส่วนต่าง ๆ ของข้าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ยกเว้นมวลชีวภาพแห้งของกลีบการใส่ซิลิคอนในการทดลองที่ 5 ให้มวลชีวภาพแห้งใบสูงที่สุด คือ 103.01 กรัมต่อตารางเมตร ส่วนการทดลองที่ 2 ให้มวลชีวภาพแห้งใบน้อยที่สุด คือ 71.46 กรัมต่อตารางเมตร (Figure 2) ซิลิคอนมีบทบาทตั้งแต่ระยะการเจริญเติบโตด้านลำต้นเป็นต้นไป โดยส่งผลให้ผนังเซลล์ของใบข้าวมีความแข็งแรงจึงช่วยให้ใบข้าวมีองศาที่ดัดขึ้นพื้นที่ใบในการรับแสงมากขึ้น การสังเคราะห์แสงจึงมีประสิทธิภาพจึงอาจทำให้ตำรับที่ 5 ซึ่งได้รับซิลิคอนอัตราสูงมีมวลชีวภาพแห้งใบสูงกว่าตำรับอื่น ๆ สำหรับมวลชีวภาพแห้งลำต้นและเมล็ดข้าวกล้อง มีค่าสูงสุดในการทดลองที่ 3 โดยมีค่าเท่ากับ 367.33 และ 346.21 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ ขณะที่การทดลองที่ 2 และ 5 ให้มวลชีวภาพแห้งลำต้นและเมล็ดข้าวกล้องน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตำรับอื่น ๆ คือ 280.33 และ 262.76 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ สำหรับมวลชีวภาพแห้งกลีบมีพิสัยอยู่ในช่วง 86.55-105.04 กรัมต่อตารางเมตร (Figure 2) Hoseinian *et al.* (2020) ศึกษาการใช้แหล่งของซิลิคอนที่แตกต่างกัน ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกต โพแทสเซียมซิลิเกต โซเดียมซิลิเกต และไบโอชาร์ ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวที่ปลูกในดิน 2 ประเภท ซึ่งมีซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ในดินดั้งเดิมอยู่ที่ 56 และ 112 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ซิลิคอนถูกสะสมในลำต้นมากขึ้นตามอัตราโพแทสเซียมซิลิเกตที่ใส่ แต่การใส่ที่อัตรา 500 กิโลกรัมซิลิคอนต่อเฮกตาร์กลับทำให้ผลผลิตน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใส่ที่อัตรา 25 กิโลกรัมซิลิคอนต่อเฮกตาร์ โดยผลผลิต และองค์ประกอบผลผลิต มีการตอบสนองต่อการใส่ไบโอชาร์ และโพแทสเซียมซิลิเกตมากกว่าซิลิคอนชนิดอื่น

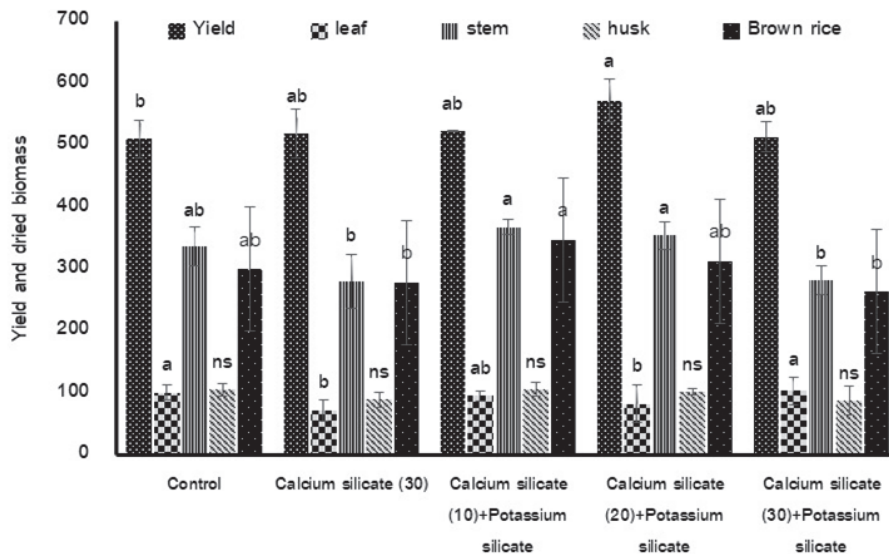


Figure 2 Effect of Si application on yield (kg/rai) and dried biomass (g/m²) in different parts of rice cv. RD 85. The mean values for bars with the same letter above them are not significantly different ($p < 0.05$) using DMRT ($p < 0.05$ for yield, leaf, stem and brown rice dried biomass, while “ns” showed in husk dried biomass). Error bars are standard error of the mean ($n=3$).

การดูดใช้ธาตุโพแทสเซียม

ระดับของซิลิคอนที่ใส่มีผลทำให้การดูดใช้โพแทสเซียมในส่วนต่างๆ ของข้าวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ยกเว้นการดูดใช้โพแทสเซียมในใบและแกลบ โดยทำการทดลองที่ 3 มีการดูดใช้โพแทสเซียมในลำต้นสูงที่สุด คือ 12.11 กิโลกรัมโพแทสเซียมต่อไร่ ขณะที่ทำการทดลองที่ 2 มีการดูดใช้โพแทสเซียมในลำต้นน้อยที่สุด คือ 8.82 กิโลกรัมโพแทสเซียมต่อไร่ (Figure 3) ตรงข้ามกับการดูดใช้โพแทสเซียมในเมล็ดข้าวกลี้ยงที่พบว่าทำการทดลองที่ 2 มีค่าสูงสุด ส่วนดำรับควบคุมมีค่าน้อยที่สุด คือ 2.72 และ 1.56 กิโลกรัมโพแทสเซียมต่อไร่ ตามลำดับ (Figure 3) สำหรับการดูดใช้โพแทสเซียมในส่วนเหนือดินทั้งหมด พบว่า มีค่าสูงสุดในดำรับทำการทดลองที่ 3 คือ 22.44 กิโลกรัมโพแทสเซียมต่อไร่ และแตกต่างทางสถิติกับดำรับทำการทดลองที่ 2 ซึ่ง

มีค่าน้อยสุด คือ 16.87 กิโลกรัมโพแทสเซียมต่อไร่ ตามลำดับ (Figure 3) ขณะที่การดูดใช้โพแทสเซียมในใบและแกลบมีพิสัยอยู่ระหว่าง 5.32-7.04 และ 0.59-0.91 กิโลกรัมโพแทสเซียมต่อไร่ ตามลำดับ จากการทดลอง พบว่า ลำต้น มีการดูดใช้ธาตุโพแทสเซียมมากที่สุด รองลงมา ได้แก่ ใบ เมล็ดข้าวกลี้ยง และแกลบ ตามลำดับ (Figure 3) เนื่องจากการวิจัยนี้ ทำการทดลองในแปลงข้าวซึ่งมีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินอยู่ในระดับสูง (143.64 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ถือว่าพอเพียงกับความต้องการของข้าว (กรมวิชาการเกษตร, 2548; ทศนีย์ และจรงค์, 2542) จึงอาจเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของการดูดใช้โพแทสเซียมในใบและแกลบระหว่างดำรับควบคุมกับดำรับที่ใส่ซิลิคอน แต่มีแนวโน้มว่าดำรับที่ฉีดพ่นซิลิคอนทางใบจะมีการดูดใช้ธาตุนี้สูงกว่าดำรับที่ไม่ได้ฉีดพ่น (Figure 3)

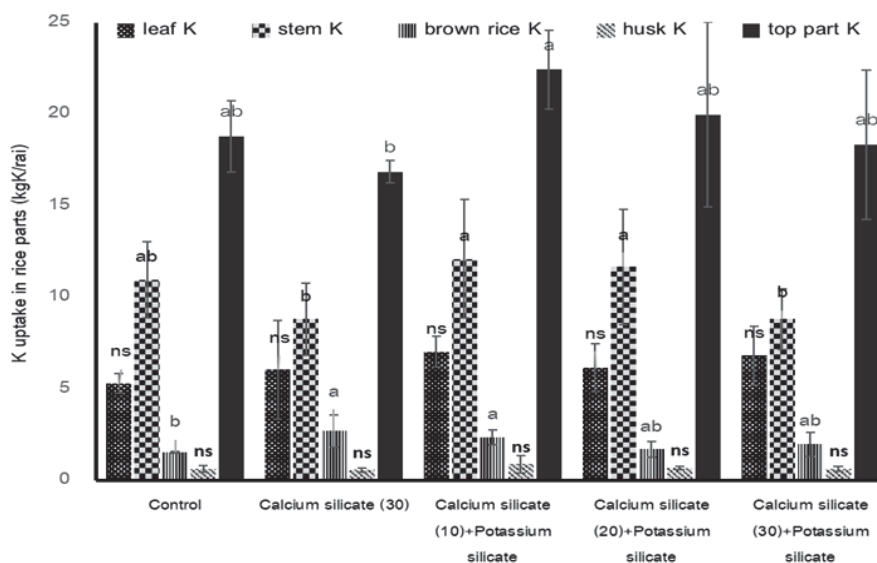


Figure 3 Effect of Si application on potassium uptake in different parts of rice cv. RD 85 (kgK/rai). The mean values for bars with the same letter above them are not significantly different ($p < 0.05$) using DMRT ($p < 0.05$ for K uptake in stem, brown rice and top part, while “ns” showed for K uptake in leaf and husk). Error bars are standard error of the mean ($n=3$).

การดูดใช้ธาตุแคลเซียม

อิทธิพลของซิลิกอนที่ใส่ต่อการดูดใช้แคลเซียมในส่วนต่างๆ ของข้าว พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในใบ เมล็ด ข้าวกล้อง และส่วนเหนือดินทั้งหมด โดยได้รับการทดลองที่ 4 มีการดูดใช้แคลเซียมในใบสูงที่สุด คือ 1.73 กิโลกรัมแคลเซียมต่อไร่ ขณะที่ได้รับการทดลองที่ 2 ซึ่งใส่แคลเซียมซิลิเกตเพียงอย่างเดียว มีการดูดใช้แคลเซียมในใบน้อยที่สุด คือ 1.01 กิโลกรัมแคลเซียมต่อไร่ สำหรับการดูดใช้แคลเซียมในเมล็ดข้าวกล้อง และส่วนเหนือดินทั้งหมด มีค่าสูงสุดในได้รับการทดลองที่ 5 คือ 0.38 และ 2.87 กิโลกรัมแคลเซียมต่อไร่ ตามลำดับ ส่วนได้รับการทดลองที่ 2 จะพบการดูดใช้ในเมล็ดข้าวกล้อง และส่วนเหนือดินน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับตัวอื่น ๆ คือ 0.04 และ 1.77 กิโลกรัมแคลเซียมต่อไร่ ตามลำดับ (Figure 4) สำหรับการดูดใช้แคลเซียมในลำต้นและแกลบ มีพิสัยอยู่ระหว่าง

0.60-0.84 และ 0.08-0.12 กิโลกรัมแคลเซียมต่อไร่ ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ใบข้าว มีการสะสมแคลเซียมมากที่สุด รองลงมา คือ ลำต้น ส่วนเมล็ดข้าวกล้อง และแกลบ มีค่าใกล้เคียงกัน (Figure 4) การที่ใบข้าวมีการสะสมแคลเซียมมากกว่าส่วนอื่นๆ เนื่องจากแคลเซียมไอออนจะถูกเคลื่อนย้ายทางไซเล็มสู่ส่วนเหนือดินและกระจายไปยังใบตามวิถีอะพوپลาสต์ การสะสมของธาตุนี้ในใบจึงสัมพันธ์กับโดยตรงกับปริมาณการคายน้ำ หากดินมีแคลเซียมอย่างเพียงพอและการคายน้ำของพืชเป็นปกติ จะพบว่าใบมีการสะสมแคลเซียมได้มากกว่าผล (ยงยุทธ, 2558; Gilliam *et al.*, 2011) สอดคล้องกับแปลงทดลองที่ใช้ ซึ่งมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินอยู่ในระดับสูง คือ 1,684.65 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ การใส่แคลเซียมซิลิเกตอัตราสูงมีแนวโน้มพบการดูดใช้แคลเซียมในใบสูงกว่าตัวที่ใส่อัตราต่ำกว่า (Figure 4)

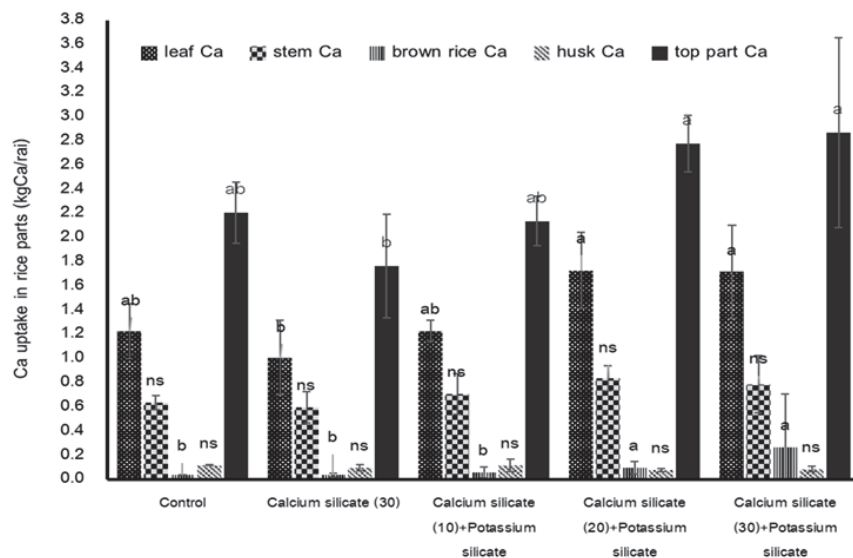


Figure 4 Effect of Si application on calcium uptake in different parts of rice cv. RD 85 (kgCa/rai). The mean values for bars with the same letter above them are not significantly different ($p < 0.05$) using DMRT ($p < 0.05$ for Ca uptake in leaf, brown rice and top part, while "ns" showed for Ca uptake in stem and husk). Error bars are standard error of the mean ($n=3$).

การดูดใช้ธาตุซิลิคอน

ระดับของซิลิคอนที่ใส่มีผลทำให้การดูดใช้ซิลิคอนในใบ ลำต้น แกลบ และส่วนเหนือดินทั้งหมดของข้าวมีความแตกต่างกันทางสถิติ ยกเว้นการดูดใช้ซิลิคอนในเมล็ดข้าวกล้องที่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ โดยมีพิสัยอยู่ในช่วง 0.32-0.48 กิโลกรัมซิลิคอนต่อไร่ ดำรับการทดลองที่ 5 มีการดูดใช้ซิลิคอนในใบสูงที่สุด คือ 5.76 กิโลกรัมซิลิคอนต่อไร่ และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติกับดำรับการทดลองที่ 2 ซึ่งมีการดูดใช้ซิลิคอนในใบน้อยที่สุด คือ 3.66 กิโลกรัมซิลิคอนต่อไร่ (Figure 5) ขณะที่ดำรับการทดลองที่ 4 มีการดูดใช้ซิลิคอนในลำต้นมากที่สุด คือ 15.63 กิโลกรัมซิลิคอนต่อไร่ ส่วนดำรับการทดลองที่ 2 มีค่าน้อยที่สุด คือ 12.38 กิโลกรัมซิลิคอนต่อไร่ การดูดใช้ซิลิคอนในแกลบและส่วนเหนือดินทั้งหมด มีค่าสูงสุดในดำรับการทดลองที่ 3 (8.74 และ 29.01 กิโลกรัมซิลิคอนต่อไร่ ตามลำดับ) ส่วนดำรับการทดลองที่ 2 ให้ค่าน้อยที่สุด คือ 6.42 และ 22.81 กิโลกรัมซิลิคอนต่อไร่ ตามลำดับ (Figure 5) แปลงที่ทำการทดลองมีซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ในระดับปานกลาง ความอุดมสมบูรณ์อยู่ในระดับสูง การใส่แคลเซียมซิลิเกตตามอัตราที่ใช้ทดลองจึงอาจทำให้การดูดใช้ซิลิคอนในใบในดำรับควบคุมมีค่าสูงกว่าดำรับการทดลองที่

2 ซึ่งใส่แคลเซียมซิลิเกตอัตรา 30 กิโลกรัมต่อไร่ แต่เมื่อพิจารณาการดูดใช้ในใบในดำรับการทดลองที่มีการฉีดพ่นซิลิคอนทางใบร่วมด้วย พบว่ามีค่าสูงกว่าการใส่ทางดินในอัตราเดียวกันเพียงอย่างเดียว จากงานทดลองของ Korndörfer *et al.* (2001) ได้เปรียบเทียบระดับซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ในแปลงปลูกข้าวเก็บตัวอย่างดินจำนวน 28 แปลง เป็นเวลา 5 ปีติดต่อกัน ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซิลิคอนในดินกับผลผลิตของข้าว เทียบมาตรฐานและแปลความหมาย โดยคำนวณเป็นผลผลิตสัมพัทธ์เพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูล ผลการศึกษาพบว่า มี 19 แปลงที่ให้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้น คิดเป็นผลผลิตสัมพัทธ์มากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ และเป็นกลุ่มที่มีปริมาณซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ในดินมากกว่า 6.5 มิลลิกรัมซิลิคอนต่อลิตร มีความเข้มข้นของซิลิคอนในตอซังมากกว่า 34 กรัมต่อกิโลกรัม ส่วนแปลงที่มีซิลิคอนในดินน้อยกว่าค่าดังกล่าว จะให้ผลผลิต น้ำหนักตอซัง ความเข้มข้นของซิลิคอนในตอซังต่ำกว่า และมีผลผลิตสัมพัทธ์น้อยกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ผลผลิตสัมพัทธ์ที่มีค่าสูงจะสัมพันธ์ทางบวกกับความเข้มข้นและการดูดใช้ซิลิคอนในตอซัง สอดคล้องกับผลผลิตข้าวที่ได้ในการทดลองซึ่งมีค่าสูงสุดในดำรับที่มีการดูดใช้ซิลิคอนในตอซังสูงสุดเช่นกัน (Figure 2 5 และ 6)

เมื่อเปรียบเทียบการกระจายของซิลิคอนในส่วนต่าง ๆ ของข้าว พบว่า ลำต้นมีการดูดใช้ซิลิคอนมากที่สุด คิดเป็น 53.55 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา ได้แก่ แกลบ ใบ และเมล็ด คิดเป็น 27.11 17.89 และ 1.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Figure 6) สอดคล้องกับ Fageria (2014) ที่กล่าวว่า ความเข้มข้นโดยเฉลี่ยของซิลิคอนในข้าว มีค่าประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเทียบเท่ากับธาตุอาหารพืชในกลุ่มมหธาตุ และกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ จะถูกดูดใช้ในส่วนของลำต้นมากกว่าส่วนอื่น ๆ ความเข้มข้นของซิลิคอนในฟางข้าวจะผันแปรอยู่ระหว่าง 2-10 เปอร์เซ็นต์ ข้าวที่ให้ผลผลิต 1 ตันต่อไร่จะดูดใช้ซิลิคอนจากดินประมาณ 77 กิโลกรัม ซิลิคอนต่อไร่ โดยที่ 80 เปอร์เซ็นต์ จะยังคงอยู่ในส่วนของตอซัง Food and Agriculture Organization [FAO] (1998) รายงานว่า ปริมาณซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในพื้นที่ทำการเกษตรจะถูกเคลื่อนย้าย

ออกไปมากที่สุดราว 210-240 ล้านตันต่อปี เมื่อเทียบกับธาตุอาหารอื่น ขณะที่ Ma and Takahashi (2002) รายงานว่า เมื่อใส่ซิลิคอนจากตอซังข้าวลงดิน จะมีรูปที่ปลดปล่อยได้ทันทีประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอีก 70 เปอร์เซ็นต์ จะใช้เวลาในการย่อยสลายไม่ต่ำกว่า 40 ปี แต่หากมองว่าซิลิกาออสฐานจากพืชเป็นแหล่งหลักของซิลิคอนในดิน การปลูกพืชอย่างต่อเนื่องจะทำให้ซิลิคอนลดน้อยลงจนมีผลต่อการให้ผลผลิต ดังนั้น การคืนเศษเหลือพืชลงแปลงจึงควรปฏิบัติอย่างสม่ำเสมอ Linam *et al.* (2024) ศึกษาบทบาทและการคงอยู่ของเหล็กออกไซด์และออกซีไฮดรอกไซด์บริเวณรากต่อการดูดซิลิคอน ฟอสฟอรัส สารหนู และซีลีเนียมของรากข้าวในดินนา พบว่า ซิลิคอนมีการกระจายในส่วนต่าง ๆ ของข้าว โดยตอซังมีการดูดใช้มากที่สุด รองลงมา ได้แก่ แกลบ และราก ขณะที่เมล็ดข้าวกล้างจะพบการดูดใช้น้อยที่สุด

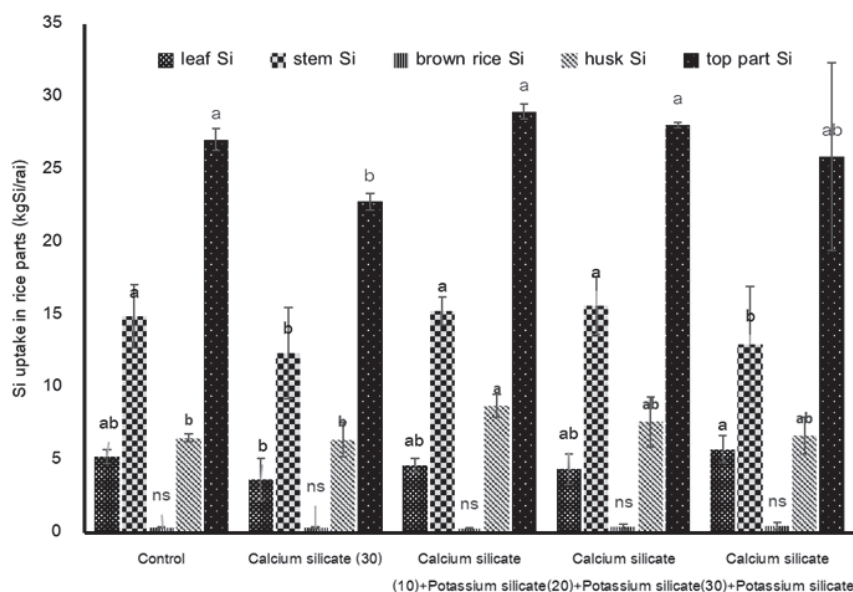


Figure 5 Effect of Si application on silicon uptake in different parts of rice cv. RD 85 (kgSi/rai). The mean values for bars with the same letter above them are not significantly different ($p < 0.05$) using DMRT ($p < 0.01$ for Si uptake in leaf, $p < 0.05$ for Si uptake in stem, husk and top part, while “ns” showed for Si uptake in brown rice). Error bars are standard error of the mean ($n=3$).



Figure 6 Si distribution in different parts of rice cv. RD 85.

ดัชนีการเก็บเกี่ยวซิลิคอน (Silicon harvest index; SHI) และผลตอบแทนการผลิตข้าว

ดัชนีการเก็บเกี่ยวซิลิคอนมีความสำคัญในการประเมินปริมาณซิลิคอนในเมล็ด และต่อชั่งจากการทดลอง พบว่า ระดับของซิลิคอนที่ใส่ไม่มีผลทำให้ดัชนีการเก็บเกี่ยวซิลิคอนแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.30- 0.37 (Table 1) จากสูตรการคำนวณ SHI หมายความว่ากว่า 63-70 เปอร์เซ็นต์ของซิลิคอนจะสะสมอยู่ในตอชั่งมากกว่าในเมล็ด สอดคล้องกับ Fageria (2014) ที่กล่าวว่า พบการสะสมซิลิคอนในตอชั่งมากกว่าในเมล็ด โดยมีค่า SHI อยู่ระหว่าง 0.17-0.20 ซึ่งค่าที่ได้อาจแตกต่างกันไป ขึ้นกับพันธุ์ข้าว ระบบการปลูก และสภาพแวดล้อม

เมื่อพิจารณาผลตอบแทนการผลิตข้าวภายใต้การจัดการปัจจัยการผลิตที่ศึกษา คือ การใส่ปุ๋ยซิลิคอน พบว่า ต้นทุนการผลิต รายได้สุทธิ และกำไร

สุทธิ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยตำรับการทดลองที่ 5 มีต้นทุนการผลิตสูงที่สุด คือ 2,519.46 บาทต่อไร่ และแตกต่างกับตำรับการทดลองอื่น ๆ ยกเว้นตำรับการทดลองที่ 2 และ 4 ส่วนตำรับควบคุม มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด คือ 1,857.36 บาทต่อไร่ (Table 1) ขณะที่ตำรับการทดลองที่ 4 ให้รายได้สุทธิสูงที่สุด คือ 6,292.82 บาทต่อไร่ ส่วนตำรับควบคุม มีรายได้สุทธิต่ำที่สุด คือ 5,609.94 บาทต่อไร่ (Table 1)

ในแง่ของกำไรสุทธิ พบว่า ตำรับการทดลองที่ 4 มีกำไรสุทธิสูงที่สุด คือ 3,983.36 บาทต่อไร่ และแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองอื่น ยกเว้นตำรับควบคุม (3,752.58 บาทต่อไร่) ส่วนตำรับการทดลองที่ 5 ให้กำไรสุทธิต่ำที่สุด คือ 3,128.03 บาทต่อไร่ (Table 1)

Table 1 Effect of Si application on silicon harvest index and economic returns.

Treatments	SHI	Cost (baht/rai)	Net income (baht/rai)	Net profit (baht/rai)	(%)
T_1 = control	0.30	1,857.36b	5,609.94c	3,752.58ab	-
T_2 = Ca_2SiO_3 (30)	0.33	2,487.36a	5,700.99b	3,213.63c	-14.36
T_3 = Ca_2SiO_3 (10) + K_2SiO_3 (2000)	0.37	2,099.46b	5,744.64b	3,645.18b	-2.86
T_4 = Ca_2SiO_3 (20) + K_2SiO_3 (2000)	0.34	2,309.46ab	6,292.82a	3,983.36a	6.15

Table 1 (continued).

Treatments	SHI	Cost (baht/rai)	Net income (baht/rai)	Net profit (baht/rai)	(%)
$T_5 = Ca_2SiO_3(30) + K_2SiO_3(2000)$	0.36	2,519.46a	5,647.49b	3,128.03c	-16.64
F-test	ns	*	*	*	-
CV (%)	14.26	10.02	9.81	10.85	-

Remark: Means within a column followed by the same letter do not differ significantly at 0.05 by DMRT.

* significant at $P < 0.05$, while ns is not statistically significant.

สรุป

จากผลการทดลอง สรุปได้ว่า ธาตุซิลิคอน มีการสะสมในลำต้นมากที่สุด รองลงมา ได้แก่ แกลบ ใบ และเมล็ด การใส่แคลเซียมซิลิเกตร่วมกับการฉีด ฟันโฟแทสเซียมซิลิเกตมีผลให้การดูดใช้โฟแทสเซียม และแคลเซียมในส่วนเหนือดินทั้งหมดมากกว่าค่ารับ ความคุมและค่ารับที่ใส่แคลเซียมซิลิเกตเพียงอย่าง เดียว สำหรับอัตราการใช้ สรุปว่า ค่ารับการทดลองที่ 4 ซึ่งใช้แคลเซียมซิลิเกตอัตรา 20 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับการ ฉีดฟันโฟแทสเซียมซิลิเกตทางใบที่ 2,000 มิลลิกรัม ซิลิคอนต่อลิตร ให้ผลผลิตและการดูดใช้ซิลิคอนใน ลำต้นสูงที่สุด รวมทั้งมีผลตอบแทนทางเศรษฐกิจสูง กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่ารับการทดลองอื่น อัตรา ดังกล่าวจึงเหมาะสมกับการใช้ในชุดดินสระบุรีที่มี ระดับของซิลิคอนที่เป็นประโยชน์ในดินดั้งเดิมระดับ ปานกลาง การใส่ซิลิคอนทางดินร่วมกับการฉีดฟัน ทางใบสามารถเพิ่มผลผลิต การดูดใช้ซิลิคอน รายได้ สุทธิ และกำไรสุทธิในการผลิตข้าวได้มากกว่าการใช้ แคลเซียมซิลิเกตทางดินเพียงอย่างเดียว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ไบโอวิซ เทคโนโลยี จำกัด ที่สนับสนุนทุนวิจัย และบริษัท ช เคมีไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารโฟแทสเซียมซิลิเกตสำหรับใช้ในงานทดลอง

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2544. คู่มือการวิเคราะห์ดิน และพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ชุมนุม สหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด, กรุงเทพฯ. 164 หน้า.

กรมวิชาการเกษตร. 2548. คำแนะนำการใส่ปุ๋ยกับพืช เศรษฐกิจ เอกสารวิชาการลำดับที่ 8/2548. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. 121 หน้า.

ชนิกานต์ เหลืองไพโรจน์. 2557. ผลของวัสดุเหลือใช้ โรงงานอุตสาหกรรมถลุงแร่เหล็กต่อการ เพิ่มผลผลิตและการสะสมธาตุหลักและ ซิลิคอนในข้าวพันธุ์ปทุมธานี 80. วิทยานิพนธ์ มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 81 หน้า.

ทัศนีย์ อัดตะนันท์ และจรัล จันทร์เจริญสุข. 2542. แบบฝึกหัดและคู่มือปฏิบัติการการ วิเคราะห์ดินและพืช. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 108 หน้า.

ยงยุทธ ไสยธสภ. 2558. ธาตุอาหารพืช. ภาควิชา ปฐพีวิทยา, คณะเกษตร กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 548 หน้า.

ยงยุทธ ไสยธสภ. บุญดิษฐ์ วรินทร์รักษ์ และสิริมา ปันศิริ. 2558. การเจริญเติบโตของข้าว. หน้า 186-217. ใน: ยงยุทธ ไสยธสภ (บก.). ดิน ธาตุอาหารและปุ๋ยข้าว. สมาคมดินและ ปุ๋ยแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

สิปปวิชญ์ ปัญญาตุ้ย. 2559. ผลของแคลเซียมซิลิเกต ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว พันธุ์ปทุมธานี 1 ในดินนาที่มีซิลิคอน แตกต่างกัน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 160 หน้า.

- Ando, H., L. Kakuda, H. Fujii, K. Suzuki and T. Ajika. 2002. Growth and canopy structure of rice plants grown under field conditions as affected by Si application. *Soil Science and Plant Nutrition* 48: 341-345.
- Bray, R.H. and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59: 39-45.
- Chen, W., X.Q. Yao, K.Z. Cai and J. Chen. 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biological Trace Element Research* 142: 67-76.
- Epstein, E. 1999. Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 50: 641-664.
- Fageria, N.K. 2014. Mineral nutrition of rice. CRC Press. New York. 552 p.
- Food and Agriculture Organization [FAO]. 1998. World agricultural center. FAOSTAT agricultural statistic data-base gateway.
- Farooq, M.A. and K.J. Dietz. 2015. Silicon as versatile player in plant and human biology: overlooked and poorly understood. *Frontiers in Plant Science* Article no. 994. [https://doi:10.3389/fpls.2015.00994](https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00994).
- Fujii, H., T. Hayasaka, K. Yokoyama and H. Ando. 1999. Effect of silica application to a nursery bed of rice on rooting ability and early growth of rice plants. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 70(6): 785-790.
- Gilliam, M., M. Dayod, B.J. Hocking, B. Xu, S.J. Conn, B.N. Kaiser, R. A. Leigh and S.D. Tyerman. 2011. Calcium delivery and storage in plant leaves: exploring the link with water flow. *Journal of Experimental Botany* 62(7): 2233-2250.
- Guntzer, F., C. Keller and J.D. Meunier. 2012. Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 32: 201-213.
- Hallmark, C.T., L.P. Wilding and N.E. Smeck. 1982. Silicon. pp. 263-271. In: A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney (Eds.). *Methods of soil analysis part 2: Chemical and biological properties-Second edition, Number 9 (Part 2) in the series agronomy*. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Hoseinian, Y., M. A. Bahmanyar, F. Sadegh-zade, M. Emadi and P. Biparv. 2020. Effects of different sources of silicon and irrigation regime on rice yield components and silicon dynamics in the plant and soil. *Journal of Plant Nutrition* 43(15): 2322-2335.
- Hossain, K.A. and S. Miyagawa. 2001. Effect of silicate materials on growth and grain yield of rice plants grown in clay loam and sandy loam soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 24(1): 1-13.
- Imaizumi, K. and S. Yoshida. 1958. Edaphological studies on silicon supplying power of paddy soils. *Bulletin of the National Institute of Agricultural Sciences* 8: 261-304.
- Inanaga, S., Y. Higuchi and N. Chishaki. 2002. Effect of silicon application on reproductive growth of rice plant. *Soil Science and Plant Nutrition* 48 (3): 341-345.

- Jones, R. L. and G. B. Dreher. 1996. Silicon. pp. 627-639. 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. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Kato, N. and N. Owa. 1997. Dissolution of slag fertilizer in paddy soil and Si uptake by rice plant. *Soil Science and Plant Nutrition* 43(2): 329-341.
- Klotzücher, T., A. Marxen, D. Vetterlein, J. Schneiker, M. Türke, N. van Sinh, N.H. Manh, H. van Chien, L. Marquez, S. Villareal, J.V. Bustamante and R. Jahn. 2015. Plant-available silicon in paddy soils as a key factor for sustainable rice production in Southeast Asia. *Basic and Applied Ecology* 16(8): 665-673.
- Korndörfer, G. H., G.H. Snyder, M. Ulloa, G. Powell and L.E. Datnoff. 2001. Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. *Journal of Plant Nutrition* 24(7): 1071-1084.
- Lavinsky, A.O., K.C. Detmann, J.V. Reis, R.T. Avila, M.L. Sanglard, L.F. Pereira, L.M.V.P Sanglard, F.A. Rodrigues, W.L. Araújo and F.M. DaMatta. 2016. Silicon improves rice grain yield and photosynthesis specifically when supplied during the reproductive growth stage. *Journal of Plant Physiology* 206: 125-132.
- Linam, F. A., M.A. Limmer and A.L. Seyfferth. 2024. Contrasting roles of rice root iron plaque in retention and plant uptake of silicon, phosphorus, arsenic, and selenium in diverse paddy soils. *Plant Soil* 502: 397-415.
- Ma, J. F. and E. Takahashi. 2002. *Soil Fertilizer and Plant Silicon Research in Japan*. Elsevier, Amsterdam. 281 p.
- Ma, J. F., N. Yamaji and N. Mitani. 2011. Transport of silicon from roots to panicles in plants. *Proceedings of the Japan Academy (Series B)* 87: 377-385.
- Pontigo, S., A. Ribera, L. Gianfreda, M.L. Mora, M. Nikolic and P. Cartes. 2015. Silicon in vascular plants: uptake, transport and its influence on mineral stress under acidic conditions. *Planta* 242: 23-37.
- Rupasinghe, M.G.N, M.M. Hanafi, M.R.Yusop, R. Ismail, P. Azizi, L.R.M. C. Liyanage and A.P. Mayakaduwa. 2022. Optimizing silicon application to improve growth, grain yield, and nutrient uptake of indica rice (*Oryza sativa* cv. Bw 367). *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science* 45(4), doi.org/10.47836/pjtas.45.4.08.
- Saito, K., A. Yamamoto, T. Sa and M. Saigusa. 2005. Rapid, micro-methods to estimate plant silicon content by dilute hydrofluoric acid extraction and spectrometric molybdenum method. *Soil Science and Plant Nutrition* 51(1): 29-36.
- Tubana, B.S., T. Babu and L.E. Datnoff. 2016. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture. *Soil Science* 181: 393-411.

Walkley, A. and C.A. Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37: 29-38.

Yoshida, S.A. 1965. Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. National Institute of Agricultural Science Series B 15: 1-58.