

ผลของแคลเซียมซิลิเกตจากอุตสาหกรรมซีเมนต์
ต่อการเจริญเติบโต และการตอบสนองกระบวนการทาง
สรีรวิทยาของข้าวเหนียวพันธุ์ กข-แม่โจ้ 2 ภายใต้สภาวะขาดน้ำ
**Effect of Calcium Silicate from Cement Industry on
Growth and Physiological Responses of Glutinous Rice
cv. RD-Mae Jo 2 under Water Deficiency Conditions**

ณิชนันท์ หะยิลาเต๊ะ*, สมชาย ชคตระการ,

พัทตร์เพ็ญ ภูมิพันธ์ และพฤกษ์ ชุตیمانุกุล

สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Nitchanan Hayilate*, Somchai Chakhatrakan,

Phakpen Poomipan and Preuk Chutimanukul

Department of Agricultural Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University,

Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Received: September 6, 2019; Accepted: October 15, 2019

บทคัดย่อ

ความเครียดที่เกิดจากการขาดน้ำเป็นอีกหนึ่งผลกระทบที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตและกระบวนการทางสรีรวิทยาของข้าวเหนียว ซึ่งจะส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของผลผลิต งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของผลแคลเซียมซิลิเกตจากอุตสาหกรรมซีเมนต์ร่วมกับการให้น้ำที่ต่างกันต่อการเจริญเติบโตและกระบวนการทางสรีรวิทยาของข้าวเหนียวพันธุ์ กข-แม่โจ้ 2 โดยวางแผนการทดลองแบบ 3x5 factorial in CRD ประกอบด้วย 2 ปัจจัย คือ การให้น้ำ 3 ระดับ ได้แก่ การให้น้ำ 100, 50 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ของความชื้นที่ระดับดินอิ่มตัวด้วยน้ำ และปริมาณของแคลเซียมซิลิเกต 5 อัตรา ได้แก่ 0, 50, 150, 300 และ 400 กิโลกรัมต่อไร่ ผลการทดลองพบว่า การให้ระดับน้ำที่ลดลงส่งผลให้ข้าวเหนียวพันธุ์ กข-แม่โจ้ 2 มีการเจริญเติบโต (ความสูง ความกว้างใบ ความยาวใบ และจำนวนต้นต่อกอ) อัตราการเปิดปิดปากใบ และอัตราการคายน้ำลดลง ขณะที่อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้น การลดระดับการให้น้ำลง 50 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใช้แคลเซียมซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้การเจริญเติบโต คือ ความสูง ความยาวใบ และจำนวนต้นต่อกอสูงกว่าสิ่งทดลองที่ไม่ใส่แคลเซียมซิลิเกต อีกทั้งยังส่งผลให้มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงมากที่สุด และยังมีแนวโน้มลดการคายน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับ การให้ระดับน้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการไม่ใส่แคลเซียมซิลิเกต

ดังนั้นจึงสามารถใช้แคลเซียมซิลิเกตจากผลพลอยได้ของอุตสาหกรรมซีเมนต์เพื่อทดแทนปุ๋ยซิลิกอนที่มีราคาแพงกว่าได้และสามารถช่วยบรรเทาความเครียดที่เกิดจากการขาดน้ำของต้นข้าว

คำสำคัญ : ข้าวพันธุ์เหนียวพันธุ์ กข-แม่โจ้ 2; การขาดน้ำ; แคลเซียมซิลิเกตจากอุตสาหกรรมซีเมนต์; การตอบสนองต่อกระบวนการทางสรีรวิทยา

Abstract

Water deficiency is the most important effect on growth and physiological responses of glutinous rice, which is affected to its quantity and quality. The aim of this study was to estimate an effect of calcium silicate from cement industry on growth and yield of glutinous rice cv. RD-Mae Jo 2 under different water supplies. The experiment was undertaken in 3×5 factorial in completely randomized design. The study factors were; (1) different water supplies, (100, 50 and 25 % of moisture at soil saturated with water), and (2) calcium silicate (0, 50, 150, 300 and 400 Kg/rai). The result showed that decreased water supply affected rice cv. RD-Mae Jo 2; growth (plant height, leaf width, leaf length and tiller number per plant), stomatal conductance and respiration rate were decreased, while the photosynthetic rate was increased. Decreased water supply to 50% with calcium silicate 400 Kg per rai promoted growth characteristics such as height, leaf length and tiller number per plant (significantly higher than those of non-calcium silicate). Moreover, photosynthetic rate was highest and trended to decrease respiration rate when compared to decreased water supply to 50% with non-calcium silicate. Therefore, calcium silicate from cement industry can be used to replace expensive silicon fertilizer and to alleviate stress caused by water deficiency of rice.

Keywords: glutinous rice RD-Mae Jo 2; water deficiency; calcium silicate from cement industry; physiological response

1. คำนำ

ข้าวเหนียว คือ พืชอาหารหลัก และพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประชากรในแถบภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (มานัส และคณะ, 2558) โดยพื้นที่การเพาะปลูกข้าวเหนียวอยู่ในบริเวณเขตชลประทานและเป็นนาขั้นน้ำวน จากปัญหาสภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลให้สภาพอากาศเกิดความแปรปรวน และฝนไม่ตกตามฤดูกาล ส่งผลให้มีน้ำไม่เพียงพอต่อการเพาะปลูก ทำให้ปริมาณและคุณภาพของผลผลิตข้าวเหนียวลดลง ข้าวเหนียวเป็นพืชที่ต้องการน้ำมากใน

ช่วงแรกของการเจริญเติบโตเพื่อใช้ในการแตกกอและต้องการน้ำมากที่สุดในระยะออกรวง (บุญหงษ์, 2547) การขาดน้ำนั้นเป็นผลจากกระบวนการคายน้ำมีอัตราสูงกว่าการดูดน้ำ เซลล์คุม (guard cell) สูญเสียความเต่งและเหี่ยว ปากใบจะแคบลงหรือปิดการแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในใบต่ำส่งผลให้พืชมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงต่ำ ลดการสร้างอาหารและสารประกอบอื่น ๆ ที่ต้องการคาร์โบไฮเดรตจากการสังเคราะห์ด้วยแสง ทำให้การเจริญเติบโตเป็นไปอย่างช้า ๆ จนถึงไม่สามารถเจริญเติบโต (สมบุญ, 2548) ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6

เป็นพันธุ์ที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคมากที่สุด เกษตรกรนิยมปลูก แต่สามารถปลูกเพียงปีละครั้งเท่านั้น และมีพื้นที่เพาะปลูกที่สำคัญอยู่ในเขตพื้นที่นาข้าว ฝนบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งมีผลกระทบน้ำไม่เพียงพอต่อการผลิต ด้วยเหตุนี้มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จึงมีการปรับปรุงพันธุ์ข้าวเหนียว จนได้สายพันธุ์ข้าวเหนียวกข-แม่โจ้ 2 ซึ่งเป็นข้าวเหนียวหอมต้นเตี้ย ไม่ไวต่อช่วงแสง มีผลผลิต องค์ประกอบของผลผลิต และคุณภาพการหุงต้มดี (วารสารแม่โจ้ปริทัศน์, 2555; ศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวขอนแก่น, 2562) ดังนั้นการบรรเทาความเครียดที่เกิดจากการขาดน้ำจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ เพื่อช่วยเพิ่มประมาณผลผลิตให้กับข้าวเหนียว และช่วยให้ได้ผลผลิตข้าวเหนียวที่มีคุณภาพสามารถส่งออกไปยังตลาดโลก

ซิลิกอน (Si) เป็นธาตุอาหารที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของข้าว (Ma and Takashashi, 2002) โดยเฉพาะในระยะเจริญพันธุ์ ซิลิกอนสามารถช่วยบรรเทาความเครียดที่เกิดจากการขาดน้ำ โดยช่วยรักษาสมดุลของน้ำในใบพืช เพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำภายในเซลล์ ส่งเสริมให้รากมีการดูดน้ำดีขึ้น ส่งเสริมอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง และการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยซิลิกอนเข้าไปมีบทบาทต่อกระบวนการเคลื่อนย้ายอิล็กตรอนในระบบการสังเคราะห์ด้วยแสง ระบบที่ 2 (Photosynthesis system II) (Wang *et al.*, 2019) นอกจากนี้รายงานของ สมชาย และคณะ (2560) พบว่าซิลิกอนจะส่งเสริมให้ข้าวมวล น้ำหนักเมล็ด ความกว้าง และความหนาของใบเพิ่มขึ้น รวมทั้งเพิ่มกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืช ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hattori และคณะ (2008) ที่รายงานว่า การใส่ซิลิกอนให้กับต้นพืชนั้น ซิลิกอนจะช่วยรักษาสมดุลการใช้น้ำของพืช โดยส่งเสริมอัตราการ

เปิดปิดปากใบ และเพิ่มความเป็นประโยชน์ของน้ำ อีกทั้งการใช้ซิลิกอนยังมีผลต่อกระบวนการการสังเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระ ส่งเสริมกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืช เช่น กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง การปรับค่าศักย์น้ำ (osmotic adjustment) เนื่องจากพืชอยู่ในสภาพขาดน้ำจะส่งผลต่อการดูดธาตุอาหารของพืช เพราะกลไกการปิดปากใบเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลต่ออัตราการคายน้ำของพืช (ยงยุทธ, 2552; Gong *et al.*, 2005) และที่สำคัญการใช้ซิลิกอนยังมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาของรากข้าว การดูดซับธาตุอาหาร กระตุ้นการแบ่งเซลล์ และขยายขนาดของเซลล์ และกระตุ้นการสังเคราะห์ ATP และ ADP (ยงยุทธ, 2552) แต่ปัจจุบันซิลิกอนที่ใช้ทางการเกษตรมีราคาสูง จึงมีแนวคิดที่จะใช้ผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมซีเมนต์ในรูปแบบของแคลเซียมซิลิเกต (Ca_2SiO_4) มาประยุกต์ใช้กับทางการเกษตร ซึ่งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ช่วยลดต้นทุนการผลิต ดังนั้นการทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตจากอุตสาหกรรมซีเมนต์ที่มีผลต่อการเพิ่มการเจริญเติบโต และการตอบสนองต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาของข้าวเหนียวพันธุ์ กข-แม่โจ้ 2 ร่วมกับการให้น้ำที่ระดับแตกต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางในการลดผลกระทบที่เกิดจากการขาดแคลนน้ำในการผลิต และเป็นแนวทางในการช่วยให้อัตราการผลิตของเกษตรกรลดลง

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ 3x5 factorial in completely randomized design (CRD) จำนวน 9 ซ้ำ ซ้ำละ 1 กระถาง กระถางละ 1 ต้น ประกอบด้วย 2 ปัจจัย ปัจจัยที่ 1 คือ ระดับการให้น้ำ 2 อัตรา ได้แก่ 100 (2 ลิตรต่อกระถาง), 50 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ของความชื้นที่ระดับดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

ปัจจัยที่ 2 คือ ปริมาณแคลเซียมซิลิเกต (ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมซีเมนต์ของบริษัท Taiheiyo Cement Corporation (ประเทศญี่ปุ่น) 5 อัตรา ได้แก่ 0, 50, 150, 300 และ 400 กิโลกรัมต่อไร่ (0, 0.96, 2.88, 5.76 และ 7.69 กรัมต่อกระถาง)

2.2 การปลูกและการดูแลรักษา

2.2.1 การเตรียมดิน

ตากหน้าดินประมาณ 1 สัปดาห์ ในระหว่างการตากมีการพลิกกลับกองดินเพื่อให้แห้งทั่วทั้งกอง เมื่อดินแห้งแล้วสูมเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำไปวิเคราะห์ดินก่อนปลูก ดังแสดงในตารางที่ 1 และวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมซีเมนต์ (แคลเซียมซิลิเกต) ดังแสดงในตารางที่ 2 จากนั้นนำมาชั่งใส่กระถางขนาด 10 นิ้ว กระถางละ 6 กิโลกรัม และใส่แคลเซียมซิลิเกตตามสิ่งทดลอง

Table 1 Soil properties before planting

Soil properties	Result
pH	6.34
E.C. (dS/m)	0.01
Organic matter (%)	0.58
Available P (mg/kg)	13.91
Available K (mg/kg)	244.62

Table 2 The composition of products from the cement industry

The composition of products from the cement industry	Result
pH	10
SiO ₂ (%)	51.65
CaO (%)	37.63
Fe ₂ O ₃ (%)	1.83
MgO (%)	0.56
Other (%)	8.33

2.2.2 การเตรียมต้นกล้าข้าว

แช่เมล็ดข้าวเหนียวพันธุ์ กข-แม่โจ้ 2 เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำเมล็ดไปบ่มด้วยผ้าขาวบาง จนเกิดตุ่มราก แล้วเพาะกล้าข้าวลงในถาดหลุมเพาะกล้าขนาด 2.4x2.4x4.0 เซนติเมตร (กว้างxยาวxสูง) โดยวัสดุที่ใช้ในการเพาะต้นกล้าข้าว ประกอบด้วยดิน ปุ๋ยอินทรีย์ และทราย อัตราส่วน 1:2:0.25 ส่วน ตามลำดับ หลังจากเพาะกล้า 14 วัน หรือมีใบจริง 2 ใบ ย้ายปลูกในกระถางขนาด 10 นิ้ว กระถางละ 1 ต้น

2.2.3 การใส่ปุ๋ย (สถาบันวิจัยข้าว, 2547)

ใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1 หลังจากย้ายกล้าข้าว 14 วัน หรือจนกว่าต้นกล้าจะแข็งแรง โดยใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 16-20-0 อัตรา 30 กิโลกรัมต่อไร่ (0.57 กรัมต่อกระถาง)

ใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 หลังย้ายกล้าข้าว 30 วัน โดยใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0 อัตรา 15 กิโลกรัมต่อไร่ (0.28 กรัมต่อกระถาง) ร่วมกับปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 อัตรา 15 กิโลกรัมต่อไร่ (0.28 กรัมต่อกระถาง)

2.3 การเก็บบันทึกผลการทดลอง

2.3.1 การบันทึกผลการเจริญเติบโต โดยบันทึกความสูง (วัดจากโคนต้นบริเวณเหนือดิน จนถึงสุดปลายใบ) ความกว้างใบ (วัดบริเวณส่วนกลางของความยาวใบที่ 2) ความยาวใบ (วัดจากโคนก้านใบจนถึงสุดปลายใบที่ 2) และจำนวนต้นตอก (นับจำนวนต้นตอกจากต้นหลัก) โดยจะบันทึกผลการเจริญเติบโตทุก ๆ 14 วัน

2.3.2 การบันทึกผลด้านสรีรวิทยา โดยบันทึกอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง อัตราการเปิดปิดปากใบ และอัตราการคายน้ำด้วยเครื่อง portable photosynthetic (Li-6400, Li-cor, USA) วัดเมื่อต้นข้าวอายุ 42 วันหลังปลูก (ระยะแตกกอ) วัดในช่วง 09:00-11:00 น. เนื่องจากเป็นช่วงที่อากาศมีแรงดึงดูดมีการระเหยน้ำในอัตราที่ต่ำที่เอื้อต่อการเปิดปิดของ

ปากใบ และเป็นช่วงที่ข้าวมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงที่สุด วัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิภายใต้ความเข้มแสงเต็มที่ $1,000 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ($A_{1,000}$) อัตราการไหล (flow rate) $500 \mu\text{mol}/\text{mol}$ โดยวัดบริเวณกลางใบของข้าวที่มีการพัฒนามากที่สุด (ใบที่ 2 ของต้นหลัก) (Zhang *et al.*, 2017)

2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำค่าเฉลี่ยที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละสิ่งทดลอง โดยใช้ Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลของแคลเซียมซิลิเกตต่อการเจริญเติบโต

เมื่อเปรียบเทียบการให้น้ำในระดับที่แตกต่างกันรวมกับการใช้แคลเซียมซิลิเกตจากอุตสาหกรรมซีเมนต์ในปริมาณที่แตกต่างกันของข้าวเหนียวพันธุ์ กข-แม่โจ้ 2 พบว่าการให้ระดับน้ำที่ลดลงส่งผลให้ความสูงต้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) ขณะที่ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ส่งผลให้มีความสูงต้นมากที่สุด คือ 97.12 เซนติเมตร (ตารางที่ 3) นอกจากนี้ยังพบปฏิสัมพันธ์ระหว่างระดับการให้น้ำและปริมาณแคลเซียมซิลิเกตต่อความสูงต้น โดยการให้ระดับน้ำ 100 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใช้แคลเซียมซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีความสูงต้นสูงที่สุด คือ 102.82 เซนติเมตร แต่ไม่ต่างจากสิ่งทดลองที่ใช้แคลเซียมซิลิเกต 300 กิโลกรัมต่อไร่ (97.20 เซนติเมตร) เมื่อพิจารณาที่ระดับการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใช้แคลเซียมซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีความสูงต้นมากที่สุด คือ 99.70 เซนติเมตร (ตารางที่ 4) และไม่ต่างกับการให้ระดับน้ำ 100 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใช้แคลเซียม

ซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่วนที่ระดับน้ำ 25 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสิ่งทดลองที่ไม่ใส่แคลเซียมซิลิเกตส่งผลให้มีความสูงต้นน้อยที่สุด คือ 50.90 เซนติเมตร และเมื่อเพิ่มแคลเซียมซิลิเกตในทุกสิ่งทดลองส่งผลให้มีความสูงต้นเพิ่มขึ้น โดยการใช้แคลเซียมซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีความสูงต้นสูงที่สุด คือ 88.85 เซนติเมตร (ตารางที่ 4) ไม่พบปฏิสัมพันธ์ระหว่างการลดระดับการให้น้ำและปริมาณแคลเซียมซิลิเกตต่อความกว้างใบ แต่ระดับการให้น้ำที่ลดลงส่งผลให้ความกว้างใบลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) เช่นเดียวกันกับปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีความกว้างใบเพิ่มขึ้นโดยการใช้แคลเซียมซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีความกว้างใบมากที่สุด คือ 1.17 เซนติเมตร ($p < 0.01$) สำหรับความยาวใบ พบว่าระดับน้ำที่ลดลงส่งผลให้ความยาวใบลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) และปริมาณแคลเซียมซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีความยาวใบสูงที่สุด คือ 75.66 เซนติเมตร (ตารางที่ 3) กล่าวคือ การให้ระดับน้ำ 100 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับแคลเซียมซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีความยาวใบสูงสุด คือ 81.67 เซนติเมตร และเมื่อพิจารณาที่ระดับน้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการใช้แคลเซียมซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีความยาวใบสูงที่สุด (75.17 เซนติเมตร) แต่ไม่ต่างกับสิ่งทดลองที่ให้ระดับน้ำ 100 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใช้แคลเซียมซิลิเกต 150 และ 300 กิโลกรัมต่อไร่ (ตารางที่ 4) เช่นเดียวกันกับการให้ระดับน้ำ 25 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใช้แคลเซียมซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีความยาวใบมากที่สุด (70.15 เซนติเมตร) และไม่แตกต่างกับการใช้แคลเซียมซิลิเกต 300 กิโลกรัมต่อไร่ (66.68 เซนติเมตร) และการให้ระดับน้ำ 25 เปอร์เซ็นต์ และไม่ใส่แคลเซียมซิลิเกตส่งผลให้มีความยาวใบน้อยที่สุด (47.37 เซนติเมตร) สำหรับจำนวนต้นต่อกอ ระดับการให้น้ำที่ลดลง

ส่งผลให้จำนวนต้นตอกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) และการใช้แคลเซียมซิลิเกตที่ 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีจำนวนต้นตอกสูงที่สุด (16.50 ต้นตอก) (ตารางที่ 3) กล่าวคือ การให้ระดับน้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับแคลเซียมซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้ข้าวเหนียวพันธุ์ กข-แม่โจ้ 2 มีจำนวนต้นตอกสูงที่สุด คือ 20.67 ต้นตอก และไม่ต่างจากการให้ระดับน้ำ 100 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใช้แคลเซียมซิลิเกต 300 และ 400 กิโลกรัมต่อไร่ (18.33 และ 19.50 ต้นตอก) ตามลำดับ และการให้ระดับน้ำ 25 เปอร์เซ็นต์ และไม่ใส่

แคลเซียมซิลิเกตส่งผลให้มีจำนวนต้นตอกน้อยที่สุด (3.17 ต้นตอก) (ตารางที่ 4)

3.2 ผลของแคลเซียมซิลิเกตต่อกระบวนการทางสรีรวิทยา

เมื่อลดระดับการให้น้ำพบว่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงขึ้น และการใช้แคลเซียมซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงมีค่าสูงที่สุด ($13.84 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) กล่าวคือ เมื่อให้ระดับน้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใช้แคลเซียมซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงที่สุด คือ 14.46

Table 3 Effects of difference water supply and calcium silicate from cement industry on growth of glutinous rice RD-Mae Jo 2.

Factor	Plant Height (cm)	Leaf width (cm)	Leaf length (cm)	Tiller number per plant
Water supply (A)				
100 %	89.91±10.09 ^{a1/}	1.24±0.21 ^a	72.23±9.44 ^a	16.53±2.51 ^a
50 %	81.50±13.42 ^b	1.02±0.13 ^b	61.60±10.99 ^b	15.07±3.70 ^b
25 %	70.43±13.51 ^c	0.78±0.11 ^c	56.65±11.56 ^c	6.43±2.31 ^c
Calcium silicate (B)				
0 kg/rai	62.98±10.44 ^{c2/}	0.86±0.16 ^d	47.37±8.28 ^e	8.94±4.50 ^e
50 kg/rai	73.65±9.09 ^{bc}	0.93±0.24 ^{cd}	56.99±7.05 ^d	11.22±4.48 ^d
150 kg/rai	80.31±9.21 ^b	1.02±0.27 ^{bc}	66.29±8.82 ^c	12.56±4.40 ^c
300 kg/rai	89.01±7.85 ^b	1.09±0.22 ^{ab}	71.16±6.01 ^b	14.17±5.44 ^b
400 kg/rai	97.12±6.48 ^a	1.17±0.22 ^a	75.66±5.02 ^a	16.50±5.47 ^a
F-test				
A	**	**	**	**
B	**	**	**	**
A*B	**	Ns	**	*
C.V. (%)	1.49	10.74	2.01	8.17

^{1/} The vertical means that follows the same letters was not statistical difference at 95 % by DMRT method when comparing the difference between water supply; ^{2/} The vertical means that follows the same letters was not statistical difference at 95 % by DMRT method when comparing the difference between calcium silicate; * = There were statistically significant difference at 95 %; ** = There were statistically significant difference at 99 %; ns = not significant difference

Table 4 Interaction between difference water supply and calcium silicate on height, leaf length and teller number per plant of glutinous rice RD-Mae Jo 2.

Calcium silicate (Kg/rai)	Water supply		
	100 %	50 %	25 %
Plant height (cm)			
0	74.88±0.83 ^{gh1/}	63.15±0.30 ^h	50.90±1.95 ^l
50	84.80±1.30 ^{cde}	72.08±0.96 ^{fg}	64.07±0.38 ^{gh}
150	89.85±0.48 ^{bcd}	82.07±1.17 ^{ed}	69.00±2.09 ^{gh}
300	97.20±0.93 ^{ab}	90.48±1.00 ^{bc}	79.33±0.08 ^{ef}
400	102.82±1.16 ^a	99.70±0.79 ^a	88.85±2.18 ^{cd}
Leaf length (cm)			
0	57.83±2.02 ^{fg}	44.90±0.58 ^{gh}	39.37±0.49 ^h
50	65.83±2.52 ^d	54.88±0.54 ^{ef}	50.27±0.38 ^{fg}
150	76.83±2.02 ^{ab}	65.25±1.58 ^d	56.80±0.94 ^e
300	79.00±1.50 ^{ab}	67.78±1.60 ^d	66.68±0.37 ^d
400	81.67±0.58 ^a	75.17±0.16 ^{bc}	70.15±0.63 ^{cd}
Tiller number per plant			
0	13.17±0.29 ^{fgh}	10.50±0.50 ^{fg}	3.17±0.29 ^j
50	15.50±1.50 ^{cde}	12.50±0.50 ^{ef}	5.67±1.26 ^{ij}
150	16.17±0.76 ^{bcd}	14.67±0.29 ^{ed}	6.83±1.15 ^{hi}
300	18.33±2.02 ^{abc}	17.00±1.00 ^{bcd}	7.17±1.26 ^{ghi}
400	19.50±0.50 ^{ab}	20.67±0.58 ^a	9.33±1.53 ^{fgh}

^{1/} Means that follows the same letters were not statistical difference at 95 % by DMRT method when comparing the difference between water supply and calcium silicate.

μmol/m²s (ตารางที่ 6) ส่วนอัตราการเปิดปิดปากใบพบว่าอัตราการเปิดปิดปากใบลดลงเมื่อมีการลดระดับการให้น้ำ แต่เมื่อพิจารณาที่ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตพบว่าไม่มีผลต่ออัตราการเปิดปิดปากใบ (ตารางที่ 5) เมื่อพิจารณาที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างการให้น้ำและปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตพบว่ามีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัน กล่าวคือ การให้น้ำ 100 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใช้แคลเซียมซิลิเกต 50, 150, 300 และ 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีอัตรา

การเปิดปิดปากใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ การใช้ที่อัตรา 150 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีอัตราการเปิดปิดปากใบสูงสุด (3.66 mmol/m²s) แต่ไม่ต่างกับการให้น้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใช้แคลเซียมซิลิเกต 50 กิโลกรัมต่อไร่ คือ 2.66 mmol/m²s (ตารางที่ 6) สำหรับอัตราการคายน้ำพบว่าการลดระดับการให้น้ำส่งผลให้อัตราการคายน้ำลดลง แต่ปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไม่มีผลต่ออัตราการคายน้ำ และพบปฏิสัมพันธ์ระหว่างระดับการให้น้ำกับ

ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกต กล่าวคือ การให้ระดับน้ำ 100 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใช้แคลเซียมซิลิเกต 300 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีอัตราการคายน้ำสูงที่สุด คือ $1.85 \text{ mmol/m}^2\text{s}$ แต่ไม่ต่างกับสิ่งทดลองที่ให้แคลเซียมซิลิเกตที่ 150 และ 400 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อพิจารณาที่ระดับน้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการใช้แคลเซียมซิลิเกตทุกอัตราไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่การใช้แคลเซียมซิลิเกตที่ 300 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีค่าอัตราการคายน้ำต่ำที่สุด คือ $1.12 \text{ mmol/m}^2\text{s}$ (ตารางที่ 6) ส่วนที่การให้น้ำ 25 เปอร์เซ็นต์ ไม่สามารถเก็บผลการทดลองนั้น

เนื่องจากขนาดของใบข้าวแสดงอาการห่อตัวที่เกิดจากการขนาดน้ำและมีขนาดของใบเล็ก จึงไม่สามารถเก็บผล

4. วิจัยณ์

4.1 ผลของแคลเซียมซิลิเกตต่อการเจริญเติบโต

การทดลองพบว่าการให้ระดับน้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใช้แคลเซียมซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีพืชเจริญเติบโต คือ ความสูง ความยาวใบ และจำนวนต้นตอก ซึ่งสูงกว่าสิ่ง

Table 5 Effects of difference water supply and calcium silicate from cement industry on physiological responses of glutinous rice RD-Mae Jo 2.

Factor	Photosynthetic rate ($\mu\text{mol/m}^2\text{s}$)	Stomatal conductance ($\mu\text{mol/m}^2\text{s}$)	Respiration rate ($\text{mmol/m}^2\text{s}$)
Water supply (A)			
100 %	$10.60 \pm 1.75^{b1/}$	2.92 ± 0.01^a	1.53 ± 0.24^a
50 %	11.63 ± 2.43^a	2.21 ± 0.01^b	1.21 ± 0.25^b
25 %	N/A	N/A	N/A
Calcium silicate (B)			
0 kg/rai	$8.19 \pm 0.48^{d2/}$	1.90 ± 0.00	1.33 ± 0.23
50 kg/rai	10.31 ± 1.07^c	2.50 ± 0.01	1.27 ± 0.18
150 kg/rai	11.79 ± 0.37^b	2.83 ± 0.01	1.43 ± 0.28
300 kg/rai	11.44 ± 0.98^b	2.64 ± 0.01	1.48 ± 0.46
400 kg/rai	13.84 ± 1.90^a	2.72 ± 0.01	1.35 ± 0.28
F-test			
A	**	**	**
B	**	ns	ns
A*B	**	*	*
C.V. (%)	5.25	20.86	15.55

^{1/} The vertical means that follows the same letters was not statistical difference at 95 % by DMRT method when comparing the difference between water supply; ^{2/} The vertical means that follows the same letters was not statistical difference at 95 % by DMRT method when comparing the difference between calcium silicate; * = There were statistically significant difference at 95 %; ** = There were statistically significant difference at 99 %; ns = not significant difference; N/A = cannot collect data

Table 6 Interaction between difference water supply and calcium silicate on photosynthetic rate, stomatal conducting and respiration rater of glutinous rice RD-Mae Jo 2.

Calcium silicate (kg/rai)	Water supply		
	100 %	50 %	25 %
Photosynthetic rate ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$)			
0	7.93±0.58 ^{e1/}	8.92±0.16 ^{de}	N/A
50	9.37±0.28 ^d	11.14±0.31 ^{bc}	N/A
150	11.56±0.23 ^{bc}	11.64±0.37 ^{bc}	N/A
300	11.91±0.40 ^{bc}	12.25±1.26 ^c	N/A
400	12.20±0.05 ^b	14.46±0.97 ^a	N/A
Stomatal conductance ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$)			
0	1.65±0.00 ^b	2.16±0.00 ^b	N/A
50	2.33±0.00 ^{ab}	2.66±0.01 ^{ab}	N/A
150	3.66±0.01 ^a	2.00±0.00 ^b	N/A
300	3.50±0.01 ^a	1.88±0.01 ^b	N/A
400	3.45±0.01 ^a	2.00±0.01 ^b	N/A
Respiration rate ($\text{mmol}/\text{m}^2\text{s}$)			
0	1.31±0.20 ^{bcd}	1.35±0.30 ^{bcd}	N/A
50	1.28±0.02 ^{bcd}	1.26±0.29 ^{bcd}	N/A
150	1.67±0.01 ^{ab}	1.20±0.19 ^{cd}	N/A
300	1.85±0.05 ^a	1.12±0.37 ^d	N/A
400	1.56±0.16 ^{abc}	1.14±0.20 ^d	N/A

^{1/} Means that follows the same letters were not statistical difference at 95 % by DMRT method when comparing the difference between water supply and calcium silicate; N/A = cannot collect data

ทดลองไม่ใส่แคลเซียมซิลิเกต ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ เจริญ (2561) ที่พบว่าเมื่อระดับน้ำลดลงจะส่งผลให้ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 มีความสูงต้น ความยาวใบ ความกว้างใบ และจำนวนต้นตอกลดลง แต่เมื่อมีการใส่ซิลิกอนที่ 300 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้ข้าวมีความสูงต้น ความยาวใบ ความกว้างใบ และจำนวนต้นตอกเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาของ ณิชนันท์ (2561) ที่พบว่าเมื่อลดระดับการให้น้ำต่อข้าวขาวดอกมะลิ 105 ส่งผลให้มีการเจริญเติบโต (ความสูง ความยาวใบ และจำนวนต้นตอ) ลดลง

และมีแนวโน้มที่ส่งผลให้มีความกว้างใบลดลง การลดระดับน้ำที่ลดลงในการทดลองนั้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดน้ำเข้าไปใช้ของต้นข้าวถูกจำกัด ส่งผลความเป็นประโยชน์ของน้ำลดลง ข้าวเป็นพืชที่ต้องการน้ำมากเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต โดยเฉพาะระยะแตกกอ (บุญหงษ์, 2547) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่พบว่าเมื่อลดระดับการให้น้ำ ความสูงต้น ความกว้างใบ ความยาวใบ และจำนวนต้นตอกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องการที่ข้าวได้รับน้ำไม่เพียงพอจะส่งผลให้การแบ่งเซลล์

และการขยายขนาดของเซลล์ลดลง นอกจากนี้เมื่อข้าวเกิดสภาวะขาดน้ำเกิดจากกระบวนการคายน้ำในอัตราที่สูงกว่าการดูดน้ำ เซลล์คุมจะสูญเสียความเต่งและเหี่ยว ปากใบจะแคบลงหรือปิด การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในใบต่ำ ส่งผลให้พืชมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงต่ำ ลดการสร้างอาหารและสารประกอบอื่น ๆ ที่ต้องการคาร์โบไฮเดรตจากการสังเคราะห์ด้วยแสง ทำให้การเจริญเติบโตเป็นไปอย่างช้า ๆ จนถึงไม่สามารถเจริญเติบโต (บุญสม, 2548) การเพิ่มให้ซิลิกอนกับต้นข้าวให้สภาวะที่เกิดความเครียดจากการขาดน้ำ ซิลิกอนจะมีบทบาทต่อการขยายขนาดของเซลล์ การแบ่งเซลล์ กระตุ้นกระบวนการเมตาบอลิซึม และส่งเสริมการสังเคราะห์ ATP, ADP และที่สำคัญช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดน้ำและธาตุอาหารให้กับข้าว (ยงยุทธ, 2552; สมชาย และคณะ, 2560; Raven, 1983) เมื่อซิลิกอนเคลื่อนย้ายมายังท่อไซเล็ม (xylem) ไปยังส่วนเหนือดินจะมีการสะสมซิลิกอนเป็นชั้นบาง ๆ ในผนังเซลล์ของเนื้อเยื่อชั้นผิว เรียกว่าชั้นซิลิกา (silica layer) ซึ่งจะช่วยให้พืชมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น (ยงยุทธ, 2552; Raven, 1983) และช่วยลดการสูญเสียน้ำของพืช (Emadian and Newton, 1989) ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ ปิยะ (2554) และ Ma และ Takahashi (2002) ที่พบว่าการสะสมของซิลิกอนในผนังเซลล์ของเนื้อเยื่อส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยเฉพาะในข้าว มีผลต่อการเจริญเติบโต โดยการสะสมซิลิกอนที่ใบช่วยลดการคายน้ำผ่านผิวคิวติน นอกจากนี้ยังช่วยให้ใบตั้งตรง ทำให้เกิดการบังแสงกันเองลดลง และทำให้พืชสามารถสังเคราะห์ด้วยแสงดีขึ้น การสะสมซิลิกอนที่ลำต้นจะช่วยส่งเสริมความแข็งแรงสามารถลดและป้องกันการหักล้มของต้นพืช และการสะสมซิลิกอนที่รากช่วยเพิ่มความสามารถในการเพิ่มออกซิเจน (oxidizing power) เพิ่มความต้านทานความเป็นพิษของเหล็ก อะลูมิเนียม และ

แมงกานีส นอกจากนี้การใช้ซิลิกอนจะช่วยเพิ่มความชื้นของโพสפורัสในดินและพืช ทำให้พืชสามารถดูดใช้โพสפורัสได้ดีขึ้น ในทางกลับกันหากมีการสะสมโพสפורัสมากเกินไป ซิลิกอนจะเป็นตัวช่วยควบคุมการเคลื่อนย้ายโพสפורัสจากรากไม่ให้ไปสะสมที่ลำต้น ซึ่งการสะสมของโพสפורัสมากเกินไปนั้น อีกทั้งส่งผลต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมในพืช ส่วนการตอบสนองต่อความเข้มข้นของซิลิกอนนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและสายพันธุ์ของพืช (ยงยุทธ, 2551)

4.2 ผลของแคลเซียมซิลิเกตต่อกระบวนการทางสรีรวิทยา

การทดลองพบว่าการใช้ระดับน้ำ 50 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใช้แคลเซียมซิลิเกต 400 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงมากที่สุด ซึ่งความเครียดที่เกิดจากการขาดน้ำมีผลกระทบต่อการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืช ซึ่งพืชมีกระบวนการปรับตัวต่อความเครียดที่เกิดขึ้น การศึกษาของ Serraj และคณะ (2009) และ Maisura และคณะ (2014) พบว่าเมื่อข้าวเกิดการขาดน้ำจะมีการปรับค่าศักย์น้ำ (water potential) เพื่อรักษาความเต่งของเซลล์ให้สามารถรักษาระดับของน้ำที่เป็นประโยชน์ภายในเซลล์ของข้าว การขาดน้ำของข้าวจะส่งผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช อัตราการคายน้ำ การเปิดปิดของปากใบ ความเป็นประโยชน์ของน้ำ การแลกเปลี่ยนก๊าซ CO₂ กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (PS II) ค่า water relative และความเสถียรของผนังเซลล์ (Kumar *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2019) การเสริมซิลิกอนให้กับพืชจะช่วยรักษาสมดุลของน้ำในพืชด้วยการควบคุมการเปิดปิดของปากใบ เพิ่มการดูดน้ำของพืช และประสิทธิภาพการใช้น้ำของพืช (Hattori *et al.*, 2008) และที่สำคัญช่วยลดการเสื่อมสภาพของคลอโรฟิลล์ เนื่องจากในสภาวะแล้ง คลอโรฟิลล์จะถูกบดบัง และเร่งให้เกิดการสลายตัว

การเสริมซิลิกอนจึงช่วยเสริมประสิทธิภาพการทำงานของโปรตีนบริเวณผนังของไทลาคอยด์ ส่งผลให้เพิ่มความจุของคลอโรฟิลล์มากขึ้น และช่วยการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (PS II) การขาดน้ำจะส่งผลให้กระบวนการดังกล่าวถูกรบกวน จึงส่งผลให้เกิดอนุมูลอิสระภายในเซลล์พืช นอกจากนี้ยังเพิ่มการทำงานของเอนไซม์ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการเกิดอนุมูลอิสระภายในเซลล์พืช อีกทั้งซิลิกอนยังมีผลต่อ K^+ ช่วยส่งเสริมให้พืชมีการดูดซึมโพแทสเซียมไอออนได้ดียิ่งขึ้น จึงส่งผลโดยตรงต่อการควบคุมการเปิดปิดปากใบ อีกทั้งโพแทสเซียมไอออนยังเป็นโคแฟกเตอร์ที่สำคัญในกระบวนการต่าง ๆ ทางสรีรวิทยาของพืช (ยงยุทธ, 2552) ส่วนที่ระดับน้ำ 25 เปอร์เซ็นต์ พบว่าต้นข้าวแสดงอาการขาดน้ำขนาดเล็ก และเกิดการเหี่ยว เนื่องจากปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต จึงส่งผลต่อ ความสูง ความยาวใบ และความกว้างใบของสิ่งทดลองดังกล่าว เนื่องจากในระยะต้นกล้าข้าวต้องใช้น้ำปริมาณมากในการเจริญเติบโต (บุญหงษ์, 2547)

5. สรุป

สภาวะการขาดน้ำหรือน้ำไม่เพียงพอต่อการเพาะปลูก เป็นปัญหาที่จะส่งผลต่อการเจริญเติบโต และกระบวนการทางสรีรวิทยาของข้าว การเสริมแคลเซียมซิลิกอนให้กับต้นข้าวเหนียวพันธุ์ กข-แม่โจ้ 2 สามารถช่วยบรรเทาความเครียดที่เกิดจากการขาดน้ำให้กับข้าวเหนียวพันธุ์ดังกล่าว ซึ่งปริมาณที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต และส่งเสริมกระบวนการทางสรีรวิทยา คือ 400 กิโลกรัมต่อไร่

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประเภททุนวิจัย

ทั่วไป สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2562 ตามเลขที่สัญญา TUGG 100/2562 และทุนบัณฑิตเรียนดี เพื่อการศึกษาต่อในหลักสูตรระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีการศึกษา 2560 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และบริษัท Taiheiyo Cement Corporation (ประเทศญี่ปุ่น) ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและอำนวยความสะดวกด้านวัสดุอุปกรณ์

7. รายการอ้างอิง

- ณิชนันท์ ทะยี่ลาเต๊ะ, 2561, ผลของแคลเซียมซิลิกอนจากอุตสาหกรรมซีเมนต์ต่อการเจริญเติบโตของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ภายใต้การให้น้ำที่แตกต่างกัน, ปัญหาพิเศษปริญญาโท, สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี.
- บุญสม เตชะภิญญาวัฒน์, 2548, สรีรวิทยาของพืช, พิมพ์ครั้งที่ 4, สำนักพิมพ์จามจุรีโปรดักท์, กรุงเทพฯ, 252 น.
- บุญหงษ์ จงคิด, 2547, ข้าวและเทคโนโลยีการผลิต, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ, 184 น.
- ปิยะ ดวงพัตรา, 2554, สารปรับปรุงดิน, พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 256 น.
- มานัส ลอศิริกุล, นันทิยา หุตานุวัตร, นพมาศ นามแดง, สุกัญญา คลังศิริกุล และประสิทธิ์ กาญจนนา, 2558, ศักยภาพในการให้ผลผลิตข้าวเหนียวพื้นเมืองโดยใช้ปุ๋ยชีวภาพและน้ำหมักชีวภาพในพื้นที่นาดินทรายปนร่วนของเกษตรกร ฤดูนาปี 2555, แก่นเกษตร 43(1): 39-52.
- ยงยุทธ โอสดสภา, 2552, ธาตุอาหารพืช, พิมพ์ครั้งที่ 3, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 529 น.

- วารสารแม่โจ้ปริทัศน์, 2555, ข้าวเหนียวหอมตันเตี้ย ไม่ไวต่อช่วงแสงสายพันธุ์แม่โจ้ 2, 4: 12-16.
- ศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวขอนแก่น, กข-แม่โจ้ 2, แหล่งที่มา : <http://kknrsc.ricethailand.go.th/index.php/e-library/varieties/311-rd-maejo-2>, 7 สิงหาคม 2562.
- สถาบันวิจัยข้าว, 2547, คำแนะนำการใช้ปุ๋ยเคมีในนาข้าวตามค่าวิเคราะห์ดิน, กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ, 41 น.
- สมชาย ชดตระกูล, พักตร์เพ็ญ ภูมิพันธ์ และอรประภา เทพศิลป์วิสุทธิ์, 2560, ผลของการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1, ว.วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 25(1): 66-74.
- เวรณี วัฒนเดชเสรี, สมชาย ชดตระกูล, พักตร์เพ็ญ ภูมิพันธ์ และพญกษ ชูติมานุกูล, 2561, ผลของซิลิกอนจากอุตสาหกรรมซีเมนต์ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ภายใต้ระดับการให้น้ำที่แตกต่างกัน, Thai J. Sci. Technol. 8(1): 31-42.
- Emadian, S.F. and Newton, R.J., 1989, Growth enhancement of loblollypine (*Pinus taeda* L.) seedlings by silicon, Plant Physiol. 134: 98-103.
- Gong, H.J., Zhu, X.Y., Chen, K.M., Wang, S. and Zhang, C.L., 2005, Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought, Plant Sci. 169: 313-321.
- Hattori, T., Sonobe K., Araki, H., Inanaga, S., An, P. and Morita, S., 2008, Effects of silicon on photosynthesis of young cucumber seedling under osmotic stress, J. Plant Nutr. 31: 1446-1458.
- Kumar, S., Dwivedi, S.K., Singh, S.S., Bhatt, B.P., Mehta, P., Elanchezian, R., Singh, V.P. and Singh, O.N., 2014, Morphophysiological traits associated with reproductive stage drought tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes under rain-fed condition of eastern Indo-Gangetic Plain, Ind. J. Plant Physiol. 19(2): 87-93
- Ma, J.F. and Takahashi, E., 2002, Soil Fertilizer and Plant Silicon Research in Japan, Elsevier Science, Amsterdam.
- Maisura, Chozin, M.A., Lubis, I., Junaedinand, A. and Ehara, H., 2014, Some physiological character responses of rice under drought conditions in a paddy system, J. Int. Soc. Southeast Asian Agric. Sci. 20: 104-114.
- Serraj, R., Kumar, A., McNally, K.L., Slamet-Loedin, I., Bruskiewich, R., Mauleon, R., Cairns, J. and Hijmans, R.J., 2009, Improvement of drought resistance in rice, Adv. Agron. 103: 41-98.
- Raven, J.A., 1983, The transport and function of silicon in plants, Biol. Rev. Camb. Philos. Soc. 58: 179-207.
- Wang, Y., Zhang, B., Jiang, D. and Chen, G., 2019, Silicon improves photosynthetic performance by optimizing thylakoid membrane protein components in rice under drought stress, Environ. Exp. Bot. 158: 117-124.
- Zhang, C., Li, X., He, Y., Zhang, J., Yan, T. and Liu, X., 2017, Physiological investigation of C₄-phosphoenolpyruvate-carboxylase-introduced rice line shows that sucrose metabolism is involved in the improved drought tolerance, Plant Physiol. 115: 328-342.