วารสารผลิตกรรมการเกษตร
JOURNAL OF AGRICULTURAL PRODUCTION
MJU

ผลของปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และองค์ประกอบผลผลิตของอ้อย

Effect of controlled release-nano material coated chemical fertilizers on growth, yield and yield components of sugarcane

ศาศวัต ชวนะศักดิ์ ชัยสิทธิ์ ทองจู* ธวัชชัย อินทร์บุญช่วย และ อัญธิชา พรมเมืองคุก

Sassawat Chawanasak Chaisit Thongjoo* Tawatchai Inboonchuay and Aunthicha Phommuangkhuk

ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140
Department of Soil Science, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140

* Corresponding author: agrcht@ku.ac.th

(Received: 27 September 2021; Revised: 10 March 2022; Accepted: 31 March 2022)

Abstract

The effect of controlled release-nano material coated chemical fertilizers on growth, yield and yield components of sugarcane *var.* Kamphaeng Saen 01-4-29 planted in Kamphaeng Saen soil series was investigated. Plots were arranged in Randomized Complete Block Design (RCBD) consisting of 8 treatments and 3 replications. The study revealed that the application of chemical fertilizers (CF) formula 16-16-16 of 50 kg/rai/time at 1 and 3 months in combination with 20 kg/rai of CF formula 46-0-0 at 3 months (T_3) gave the highest fresh yield, weight/stalk, stalk diameter, CCS and concentrations of N in stalks. This was not significantly different from the application of controlled release-nano material coated chemical fertilizers (CR-NF-New) formula 12-12-12 of 66 kg/rai/time at 3 months (T_5), the application of controlled release-nano material coated chemical fertilizers (CR-NF-Original) formula 12-12-12 of 66 kg/rai/time at 3 months (T_4) and the application of chemical fertilizer based on soil chemical analysis (T_2). Furthermore, T_3 gave the highest sugar yield and concentrations of P in stalks which was not significantly different from the comparable to T_5. While, T_5 gave the highest concentrations of Zn and B in stalks,

followed by that the application of controlled release-nano material coated chemical fertilizers (CR-NF-New) formula 12-12-12 of 33 kg/rai/time at 3 months (T_8), T_4 and T_3, respectively.

Keywords: controlled release-nano chemical fertilizers, sugarcane, Zinc, Boron

บทคัดย่อ

ศึกษาผลของปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และองค์ประกอบผลผลิตของอ้อยพันธุ์กำแพงแสน 01-4-29 ที่ปลูกในชุดดินกำแพงแสน โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (RCBD) ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ประกอบด้วย 8 ตำรับทดลอง ผลการทดลองพบว่า การใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 อัตรา 50 กิโลกรัม/ไร่/ครั้ง ที่อายุ 30 และ 90 วันหลังปลูก และปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0 อัตรา 20 กิโลกรัม/ไร่ ที่อายุ 90 วันหลังปลูก (T_3) มีผลให้ผลผลิตอ้อยสด น้ำหนักต่อลำ เส้นผ่านศูนย์กลางลำ CCS และปริมาณความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจนที่สะสมในลำของอ้อยมากที่สุด ไม่แตกต่างกับการใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยสูตร 12-12-12 (สูตรใหม่) อัตรา 66 กิโลกรัม/ไร่/ครั้ง ที่อายุ 30 วันหลังปลูก (T_5) การใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยสูตร 12-12-12 (สูตรเดิม) อัตรา 66 กิโลกรัม/ไร่/ครั้ง ที่อายุ 30 วันหลังปลูก (T_4) และการใส่ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดิน (T_2) นอกจากนี้ T_3 ยังมีผลให้ผลผลิตน้ำตาล และปริมาณความเข้มข้นของธาตุฟอสฟอรัสที่สะสมในลำของอ้อยมากที่สุด ไม่แตกต่างกับ T_5 ขณะที่ T_5 มีผลให้ปริมาณความเข้มข้นของธาตุสังกะสี และโบรอนที่สะสมในลำของอ้อยมากที่สุด รองลงมาคือ การใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยสูตร 12-12-12 (สูตรใหม่) อัตรา 33 กิโลกรัม/ไร่/ครั้ง ที่อายุ 30 วันหลังปลูก (T_8), T_4 และ T_3 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย อ้อย สังกะสี โบรอน

คำนำ

ปัจจุบันเกษตรกรผู้ปลูกพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยมักประสบปัญหาต้นทุนการผลิตที่สูงและรายได้จากผลผลิตลดลง (นาวา และคณะ, 2562) แนวทางในการทำการเขตกรรมเพื่อเพิ่มผลผลิตพืชที่ปฏิบัติโดยทั่วไปคือ การใช้ปุ๋ยเคมีเพื่อเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้น แต่ปุ๋ยเคมีที่เกษตรกรใช้ส่วนใหญ่มีสมบัติละลายน้ำและทำปฏิกิริยากับดินได้อย่างรวดเร็วหลังจากใส่ลงดิน (ปิยะ, 2538) ทำให้ธาตุอาหารในปุ๋ยเคมีที่ละลายง่ายบางส่วนทำปฏิกิริยากับดินและถูกตรึงอยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ บางส่วนสูญหายโดยกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊สโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ผ่านกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) การสูญหายในรูปแอมโมเนียของปุ๋ยไนโตรเจน (ammonia volatilization) อิมโมบิไลเซชัน (immobilization) และการชะละลายของปุ๋ยเคมีหลายชนิด (leaching) เป็นต้น (Mullen, 2011) ส่งผลให้ปริมาณธาตุอาหารบางส่วนในปุ๋ยเคมีเท่านั้นที่พืชสามารถดูดใช้ได้จริง ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วย

วัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยซึ่งผลิตโดยศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2557) คือ ปุ๋ยเคมีชนิดเม็ดที่ธาตุอาหารถูกควบคุมการปลดปล่อยออกมาสู่สารละลายดินโดยสารหุ้มผิวเม็ดในรูปสารโพลิเมอร์นาโนเคลย์คอมโพสิท (nano-clay composite) มีสมบัติในการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารที่มีในปุ๋ยเคมีเมื่ออยู่ในดิน โดยปลดปล่อยออกมาอย่างช้า ๆ และมีระยะเวลาการปลดปล่อยธาตุอาหารยาวนานเพื่อปลดปล่อยธาตุอาหารพืชในเม็ดปุ๋ยออกมาในอัตราที่สอดคล้องสมดุลกับปริมาณการดูดใช้ของพืชปลูกแต่ละชนิด การใช้ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของพืชปลูกต่อการดูดใช้ธาตุอาหารพืชที่มีในปุ๋ยเคมีโดยไม่ต้องแบ่งใส่หลายครั้ง และใช้ในอัตราที่ต่ำกว่าปุ๋ยเคมีประเภทละลายเร็ว ทั้งนี้จะเห็นได้จากผลการวิจัยที่พบว่าการใช้ปุ๋ยเคมีประเภทควบคุมการปลดปล่อย โดยเฉพาะปุ๋ยเคมีไนโตรเจน จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดใช้ไนโตรเจนของอ้อยได้อย่างมีนัยสำคัญ (Verburg *et al*., 2017) และการใช้ปุ๋ยเคมีประเภทควบคุมการปลดปล่อยในอ้อยยังสามารถเพิ่มผลผลิตอ้อยสดและผลผลิตน้ำตาลสูงกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีประเภทละลายเร็ว (Garrett *et al*., 2017) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยเพื่อการผลิตพืชไร่เศรษฐกิจในประเทศไทยมีค่อนข้างน้อย จึงกำหนดวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และองค์ประกอบผลผลิตของอ้อยที่ปลูกในชุดดินกำแพงแสน ทั้งนี้เพื่อเป็นข้อมูลที่สำคัญและเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับเกษตรกรผู้ปลูกอ้อยในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

ศึกษาผลของปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยต่อการเจริญเติบโต ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของอ้อยพันธุ์กำแพงแสน 01-4-29 ในช่วงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2563 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2564 ณ แปลงทดลองของภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ซึ่งเป็นชุดดินกำแพงแสน (Kamphaeng Saen soil series, Ks; Typic Haplustalfs; fine-silty, mixed, semiactive, isohyperthermic) (Soil Survey Staff, 2003) โดยเก็บตัวอย่างดินก่อนปลูกจากแปลงทดลองที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร เพื่อวิเคราะห์สมบัติบางประการของดิน ซึ่งใช้วิธีการวิเคราะห์ดินตามหลักคู่มือปฏิบัติการวิเคราะห์ดินและพืช (ทัศนีย์ และจงรักษ์, 2542) ได้แก่ ค่า pH (1:1) ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดินในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ (EC_e) ปริมาณอินทรียวัตถุ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ รวมทั้งเนื้อดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2558) (Table 1) จากนั้น นำผลการวิเคราะห์ปริมาณอินทรียวัตถุ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มากำหนดอัตราปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินสำหรับอ้อยปลูก คือ 12, 3 และ 12 กิโลกรัม N, P_2O_5 และ K_2O ต่อไร่ ตามลำดับ (กรมวิชาการเกษตร, 2553) งานทดลองนี้ประกอบด้วย 24 แปลงย่อย แต่ละแปลงย่อยมีขนาดกว้าง 7.5 เมตร ยาว 8.0 เมตร จำนวน 5 แถว ระยะห่างระหว่างแถว 1.5 เมตร เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตและผลผลิตของอ้อยเฉพาะ 3 แถวกลาง เว้นหัวและท้ายแถวประมาณ 1 เมตร โดยมีพื้นที่เก็บเกี่ยวในแต่ละแปลงย่อยเท่ากับ 4.5×6.0

ตารางเมตร วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block จำนวน 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำประกอบด้วย 8 ตำรับทดลอง (Table 2) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ 1) ไม่ใส่ปุ๋ยเคมี (control, T_1) 2) ใส่ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร (CF_{DOA}, T_2) 3) ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 อัตรา 50 กิโลกรัม/ไร่/ครั้ง ที่อายุ 30 และ 90 วันหลังปลูก และปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0 อัตรา 20 กิโลกรัม/ไร่ ที่อายุ 90 วันหลังปลูก (T_3) 4) ใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยสูตร 12-12-12 (สูตรเดิม) อัตรา 66 กิโลกรัม/ไร่/ครั้ง ที่อายุ 30 วันหลังปลูก (T_4) 5) ใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยสูตร 12-12-12 (สูตรใหม่) อัตรา 66 กิโลกรัม/ไร่/ครั้ง ที่อายุ 30 วันหลังปลูก (T_5) 6) ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 อัตรา 25 กิโลกรัม/ไร่/ครั้ง ที่อายุ 30 และ 90 วันหลังปลูก และปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0 อัตรา 10 กิโลกรัม/ไร่ ที่อายุ 90 วันหลังปลูก (T_6) 7) ใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยสูตร 12-12-12 (สูตรเดิม) อัตรา 33 กิโลกรัม/ไร่/ครั้ง ที่อายุ 30 วันหลังปลูก (T_7) และ 8) ใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยสูตร 12-12-12 (สูตรใหม่) อัตรา 33 กิโลกรัม/ไร่/ครั้ง ที่อายุ 30 วันหลังปลูก (T_8) อนึ่ง ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยสูตร 12-12-12 (สูตรใหม่) เป็นปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่พัฒนาขึ้นด้วยกรรมวิธีการเคลือบเม็ดปุ๋ยเคมีให้มีสมบัติละลายช้า โดยอาศัยสารหุ้มผิวเม็ดในรูปสารโพลิเมอร์นาโนเคลย์คอมโพสิท ซึ่งมีส่วนผสมของธาตุสังกะสี และโบรอนในสารเคลือบด้วย (ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2557)

เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของอ้อยที่อายุ 3, 6, 8 และ 9 เดือนหลังปลูก ได้แก่ ความสูงต้น จำนวนลำใน 1 แถวเมตร และค่าความเขียวของใบ (SPAD unit) (วัดตำแหน่งใบที่ 3-5 จากปลายยอด ทำการวัด 5 ครั้งต่อใบ) ซึ่งวัดโดยใช้เครื่อง chlorophyll meter (SPAD-502 model) ส่วนการเก็บข้อมูลผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของอ้อยที่อายุ 12 เดือนหลังปลูก ได้แก่ ผลผลิตต่อไร่ น้ำหนักต่อลำ ความยาวลำ เส้นผ่านศูนย์กลางลำ ค่า CCS (commercial cane sugar) โดยอาศัยสมการของ Meade and Chen (1977) และผลผลิตน้ำตาล โดยคำนวณจากสูตรดังนี้

$$\text{ผลผลิตของน้ำตาล} = \frac{\text{CCS} \times \text{ผลผลิตอ้อยสด (ตัน/ไร่)}}{100}$$

นอกจากนี้ วิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารที่สะสมในลำ ได้แก่ ความเข้มข้นธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมตามที่ได้อธิบายไว้โดย ทัศนีย์ และจงรักษ์ (2542) ปริมาณธาตุสังกะสีทั้งหมดในท่อนลำ ตามที่ได้อธิบายไว้โดย Lindsay and Norvell (1978) และปริมาณโบรอนทั้งหมดในท่อนลำ ตามวิธี Azomethine-H จากนั้น นำไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร ตามที่ได้อธิบายไว้โดย ทัศนีย์และจงรักษ์ (2542) โดยข้อมูลการเจริญเติบโต ผลผลิต และองค์ประกอบผลผลิตที่ได้จากการทดลอง นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (analysis of variance) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ DMRT (Duncan's multiple range test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม Statistical Package for the Social Science for Windows (SPSS) version 22

Table 1 Properties of soil before the experiment

Properties	Results (0-30 cm)	Rating
pH (1:1 water)	7.33	neutral
EC_e (dS/m)	0.53	non-saline
Organic matter (%)	1.36	moderately low
Available P (mg/kg)	33.59	high
Exchangeable K (mg/kg)	54.72	low
Exchangeable Ca (mg/kg)	1,124	high
Exchangeable Mg (mg/kg)	94.56	moderately
Exchangeable Na (mg/kg)	32.54	-
Extractable Zn (mg/kg)	0.67	low
Extractable B (mg/kg)	0.54	low
Texture	sandy loam	-

Table 2 Information of experimental treatments

Treat-ments	Treatment descriptions				Quantity of major elements (N-P_2O_5-K_2O kg/rai)
	Fertilizer materials	Fertilizer grades	Applied rates (kg/rai)	Applied time (months)	
T_1	-	-	-	-	0 - 0 - 0
T_2	CF[1/]	21-0-0 0-42-0 0-0-60	28.57, 28.57 7.14 20	2, 4 4 4	12 - 3 - 12
T_3	CF[1/]	16-16-16 46-0-0	50, 50 20	1, 3 3	25.2 - 16 - 16
T_4	CR-NF (original)[2/]	12-12-12	66	1	7.92 - 7.92 - 7.92
T_5	CR-NF (new)[2/]	12-12-12	66	1	7.92 - 7.92 - 7.92
T_6	CF[1/]	16-16-16 46-0-0	25, 25 10	1, 3 3	12.6 - 8 - 8
T_7	CR-NF (original)[2/]	12-12-12	33	1	3.96 - 3.96 - 3.96
T_8	CR-NF (new)[2/]	12-12-12	66	1	7.92 - 7.92 - 7.92

Notes [1/] = chemical fertilizer [2/] = controlled release-nano chemical fertilizers

ผลการวิจัยและวิจารณ์

1. การเจริญเติบโตของอ้อย

การใส่ปุ๋ยเคมีชนิดเม็ดธรรมดา การใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรเดิม) หรือการใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรใหม่) รวมทั้งตำรับควบคุม (control) มีผลให้ความสูงของต้นอ้อยที่อายุ 3, 6, 8 และ 9 เดือนหลังปลูก แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (Table 3) กล่าวคือ ที่อายุ 3 เดือนหลังปลูก พบว่า T_3 มีผลให้ความสูงของต้นอ้อยมากที่สุด (120.60 เซนติเมตร) รองลงมาคือ T_5 ซึ่งไม่แตกต่างกับ T_4 และ T_2 ที่อายุ 6 และ 9 เดือนหลังปลูก พบว่า T_3 มีผลให้ความสูงของต้นอ้อยมากที่สุด ไม่แตกต่างกับ T_5 ส่วนที่อายุ 8 เดือนหลังปลูก พบว่า T_3 มีผลให้ความสูงของต้นอ้อยมากที่สุด (278.50 เซนติเมตร) รองลงมาคือ T_5 ซึ่งไม่แตกต่างกับ T_4 นอกจากนี้ มีข้อสังเกตว่าการใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรใหม่) (T_5) มีแนวโน้มให้ความสูงต้นของอ้อยที่อายุ 6 และ 9 เดือนหลังปลูกใกล้เคียงกับการใช้ปุ๋ยเคมีชนิดเม็ดธรรมดา (T_3) แม้ว่า T_5 จะมีปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมน้อยกว่าปริมาณธาตุอาหารหลักของ T_3 เท่ากับ 3.18, 2.02 และ 2.02 เท่า ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการวิจัยที่รายงานว่าการใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยมีผลทำให้อ้อยมีความสูงของลำต้นมากกว่าหรือใกล้เคียงกับการใช้ปุ๋ยเคมีชนิดเม็ดธรรมดา โดยช่วยลดการสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหารหลักในปุ๋ยโดยเฉพาะธาตุไนโตรเจน (Bhanuvally *et al.*, 2017)

การใส่ปุ๋ยเคมีชนิดเม็ดธรรมดา การใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรเดิม) หรือการใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรใหม่) รวมทั้งตำรับควบคุม มีผลให้จำนวนลำใน 1 แถวเมตรของอ้อยที่อายุ 3, 6, 8 และ 9 เดือนหลังปลูก แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (Table 4) กล่าวคือ T_3 มีผลให้จำนวนลำใน 1 แถวเมตรของอ้อยมากที่สุด ไม่แตกต่างกับ T_5, T_4, T_2 และ T_6 โดยมีข้อสังเกตว่าจำนวนลำใน 1 แถวเมตรของอ้อยที่อายุ 8 และ 9 เดือน มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเจริญเติบโตของอ้อยในด้านความสูงเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการบังแสง ดังนั้น เมื่อหน่ออ้อยที่เกิดขึ้นใหม่ไม่ได้รับแสงอย่างเหมาะสม จึงส่งผลให้การสังเคราะห์แสงลดลง หรืออาจเป็นผลจากการแก่งแย่งธาตุอาหารจึงทำให้หน่อใหม่ไม่สามารถเจริญเติบโตต่อไปได้ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวเป็นไปในลักษณะเดียวกับงานวิจัยของณัฐภัทร และคณะ (2562)

การใส่ปุ๋ยเคมีชนิดเม็ดธรรมดา การใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรเดิม) หรือการใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรใหม่) รวมทั้งตำรับควบคุม มีผลให้ค่าความเขียวของใบอ้อยที่อายุ 3, 6, 8 และ 9 เดือนหลังปลูก แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 5) กล่าวคือ ที่อายุ 3, 6 และ 8 เดือน พบว่า T_3 มีผลให้ค่าความเขียวของใบอ้อยมากที่สุด ไม่แตกต่างกับ T_5, T_4, T_2 และ T_6 ส่วนที่อายุ 9 เดือนหลังปลูก พบว่า T_3 มีผลให้ค่าความเขียวของใบอ้อยมากที่สุด ไม่แตกต่างกับ T_5 และ T_4 โดยมีข้อสังเกตว่าค่าความเขียวของใบอ้อยที่อายุ 8 และ 9 เดือนหลังปลูก มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาของการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน ทั้งนี้เนื่องจากชุดดินกำแพงแสนมีปริมาณอินทรียวัตถุในระดับค่อนข้างต่ำ ดังนั้น ปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่ลดลง

ตามระยะเวลา จึงส่งผลให้ค่าความเขียวของใบอ้อยลดลง ทั้งนี้เนื่องจากไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์นั่นเอง (ยงยุทธ, 2558) อย่างไรก็ตาม ตำรับควบคุมมีผลให้ความสูงของต้น จำนวนลำใน 1 แถวเมตร และค่าความเขียวของใบอ้อยน้อยที่สุดทุกระยะการเจริญเติบโต

Table 3 Height of sugarcane at different ages

Treatments	Height (cm)			
	3 MAP	6 MAP	8 MAP	9 MAP
T_1	$59.74^{e\ 1/}$	$124.24^{e\ 1/}$	$168.42^{f\ 1/}$	$183.42^{e\ 1/}$
T_2	106.54^{bc}	203.56^{bc}	251.46^{cd}	275.35^{c}
T_3	120.60^{a}	218.63^{a}	278.50^{a}	300.35^{a}
T_4	108.60^{b}	206.34^{bc}	257.48^{bc}	281.53^{bc}
T_5	112.67^{b}	211.56^{ab}	264.24^{b}	289.53^{ab}
T_6	100.33^{c}	196.46^{c}	245.20^{d}	270.38^{c}
T_7	80.49^{d}	153.25^{d}	222.55^{e}	235.19^{d}
T_8	83.62^{d}	161.42^{d}	226.44^{e}	239.08^{d}
F-test	**	**	**	**
CV (%)	14.76	13.22	12.63	13.46

Notes MAP = months after planting
$^{1/}$ means within the same column followed by the same letter indicate no statistical difference by DMRT
** indicates significant difference at $P< 0.01$

Table 4 Number of stalks within a one-meter row of sugarcane at different ages

Treatments	Number of stalks within a one-meter row			
	3 MAP	6 MAP	8 MAP	9 MAP
T_1	$7.12^{c\ 1/}$	$6.98^{c\ 1/}$	$6.73^{d\ 1/}$	$6.58^{c\ 1/}$
T_2	10.28^{a}	12.24^{a}	12.11^{ab}	11.92^{a}
T_3	10.62^{a}	12.56^{a}	12.31^{a}	12.26^{a}
T_4	10.34^{a}	12.36^{a}	12.16^{ab}	12.03^{a}
T_5	10.53^{a}	12.43^{a}	12.22^{a}	12.13^{a}
T_6	10.22^{a}	12.18^{a}	12.08^{ab}	11.83^{a}
T_7	9.12^{b}	11.32^{b}	11.24^{c}	11.21^{b}
T_8	9.25^{b}	11.42^{b}	11.31^{bc}	11.36^{b}
F-test	**	**	**	**
CV (%)	14.76	12.68	13.46	12.19

Notes MAP = months after planting
$^{1/}$ means within the same column followed by the same letter indicate no statistical difference by DMRT
** indicates significant difference at $P< 0.01$

Table 5 Leaf greenness (SPAD reading) of sugarcane at different ages

Treatments	SPAD reading			
	3 MAP	6 MAP	8 MAP	9 MAP
T_1	34.63$^{b\ 1/}$	33.82$^{c\ 1/}$	32.18$^{d\ 1/}$	30.28$^{f\ 1/}$
T_2	39.83^{a}	47.11^{a}	43.86^{ab}	41.86^{bc}
T_3	42.86^{a}	48.73^{a}	46.13^{a}	44.68^{a}
T_4	40.51^{a}	47.26^{a}	45.14^{a}	43.51^{ab}
T_5	40.73^{a}	48.51^{a}	45.26^{a}	43.78^{ab}
T_6	39.64^{a}	46.38^{a}	43.53^{ab}	40.83^{cd}
T_7	36.18^{b}	42.61^{b}	38.72^{c}	36.56^{e}
T_8	36.26^{b}	42.85^{b}	40.87^{bc}	38.73^{de}
F-test	*	**	**	**
CV (%)	12.48	13.47	12.86	13.68

Notes MAP = months after planting

$^{1/}$ means within the same column followed by the same letter indicate no statistical difference by DMRT

* indicates significant difference at $P< 0.05$

** indicates significant difference at $P< 0.01$

2. ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของอ้อย

2.1 ผลผลิตอ้อยสด และน้ำหนักต่อลำ

การใส่ปุ๋ยเคมีชนิดเม็ดธรรมดา การใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรเดิม) หรือการใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรใหม่) รวมทั้งตำรับควบคุม มีผลให้ผลผลิตอ้อยสด และน้ำหนักต่อลำของอ้อยที่อายุ 12 เดือนหลังปลูก แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (Table 6) กล่าวคือ T_3 มีผลให้ผลผลิตอ้อยสดและน้ำหนักต่อลำของอ้อยมากที่สุด (23.56 ตัน/ไร่ และ 2.31 กิโลกรัม/ลำ ตามลำดับ) ไม่แตกต่างกับ T_5, T_4 และ T_2 ขณะที่ตำรับควบคุมมีผลให้ผลผลิตอ้อยสด และน้ำหนักต่อลำของอ้อยต่ำที่สุด (8.48 ตัน/ไร่ และ 1.01 กิโลกรัม/ลำ ตามลำดับ)

2.2 ความยาวลำ และเส้นผ่านศูนย์กลางลำ

การใส่ปุ๋ยเคมีชนิดเม็ดธรรมดา การใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรเดิม) หรือการใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรใหม่) รวมทั้งตำรับควบคุม มีผลให้ความยาวลำและเส้นผ่านศูนย์กลางลำของอ้อยที่อายุ 12 เดือนหลังปลูก แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (Table 6) กล่าวคือ T_3 มีผลให้ความยาวลำของอ้อยมากที่สุด (283.41 เซนติเมตร) ไม่แตกต่างกับ T_5 และ T_4 นอกจากนี้ T_3 ยังมีผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางลำของอ้อยมากที่สุด (3.42 เซนติเมตร) ไม่แตกต่างกับ T_5, T_4, T_2 และ T_6 ขณะที่ตำรับควบคุมมีผลให้ความยาวลำและเส้นผ่านศูนย์กลางลำของอ้อยตอน้อยที่สุด (169.50 และ 2.22 เซนติเมตร ตามลำดับ)

2.3 ค่า CCS และผลผลิตน้ำตาล

การใส่ปุ๋ยเคมีชนิดเม็ดธรรมดา การใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรเดิม) หรือการใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรใหม่) รวมทั้งตำรับควบคุม มีผลให้ค่า CCS และผลผลิตน้ำตาลของอ้อยที่อายุ 12 เดือนหลังปลูก แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (Table 6) กล่าวคือ T_3 มีผลให้ค่า CCS ของอ้อยมากที่สุด (13.86 เปอร์เซ็นต์) ไม่แตกต่างกับ T_5, T_4, T_2 และ T_6 ขณะที่ T_3 ยังมีผลให้ผลผลิตน้ำตาลของอ้อยมากที่สุด (3.27 ตัน/ไร่) ไม่แตกต่างกับ T_5 ส่วนตำรับควบคุมมีผลให้ค่า CCS และผลผลิตน้ำตาลของอ้อยน้อยที่สุด (8.35 เปอร์เซ็นต์ และ 0.71 ตัน/ไร่ ตามลำดับ)

Table 6 Yield, weight/stalk, stalk height, stalk diameter, CCS and sugar yield of sugarcane at 12 months

Treatments	Yield (ton/rai)	Weight/ stalk (kg)	Stalk height (cm)	Stalk diameter (cm)	CCS (%)	Sugar yield (ton/rai)
T_1	$8.48^{d1/}$	$1.01^{d1/}$	$169.50^{e1/}$	$2.22^{c1/}$	$8.35^{c1/}$	$0.71^{f1/}$
T_2	20.84^{ab}	2.18^{ab}	270.36^{bc}	3.30^{a}	13.32^{a}	2.78^{c}
T_3	23.56^{a}	2.31^{a}	283.41^{a}	3.42^{a}	13.86^{a}	3.27^{a}
T_4	22.53^{a}	2.22^{ab}	276.51^{ab}	3.33^{a}	13.48^{a}	3.04^{b}
T_5	22.76^{a}	2.27^{ab}	280.36^{a}	3.40^{a}	13.69^{a}	3.12^{ab}
T_6	19.16^{bc}	2.14^{b}	262.67^{c}	3.27^{a}	12.96^{a}	2.48^{d}
T_7	16.36^{c}	1.81^{c}	222.60^{d}	3.02^{b}	10.65^{b}	1.74^{e}
T_8	16.84^{c}	1.87^{c}	228.63^{d}	3.10^{b}	10.89^{b}	1.83^{e}
F-test	**	**	**	**	**	**
CV (%)	13.87	11.38	12.18	11.28	12.42	10.48

Notes $^{1/}$ means within the same column followed by the same letter indicate no statistical difference by DMRT

** indicates significant difference at $P< 0.01$

2.4 ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่สะสมในลำของอ้อย

การใส่ปุ๋ยเคมีชนิดเม็ดธรรมดา การใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรเดิม) หรือการใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรใหม่) รวมทั้งตำรับควบคุม มีผลให้ความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม สังกะสี และโบรอนที่สะสมในลำของอ้อยที่อายุ 12 เดือนหลังปลูก แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (Table 7) กล่าวคือ T_3 มีผลให้ความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจนที่สะสมในลำของอ้อยมากที่สุด (0.322 เปอร์เซ็นต์) ไม่แตกต่างกับ

T_5, T_4, T_2 และ T_6 นอกจากนี้ T_3 มีผลให้ความเข้มข้นของธาตุฟอสฟอรัสที่สะสมในลำของอ้อยมากที่สุด (0.087 เปอร์เซ็นต์) ไม่แตกต่างกับ T_5 ส่วน T_3 มีผลให้ความเข้มข้นของธาตุโพแทสเซียมที่สะสมในลำของอ้อยมากที่สุด (0.489 เปอร์เซ็นต์) ไม่แตกต่างกับ T_5 และ T_4 อย่างไรก็ตาม T_5 มีผลให้ความเข้มข้นของธาตุสังกะสี และโบรอนที่สะสมในลำของอ้อยมากที่สุด (12.63 และ 9.42 mg/kg ตามลำดับ) รองลงมา คือ T_8, T_4 และ T_3 ตามลำดับ ขณะที่ตำรับควบคุมมีผลให้ความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม สังกะสี และโบรอนที่สะสมในลำของอ้อยน้อยที่สุด (0.134, 0.022, 0.176 เปอร์เซ็นต์ 1.93 และ 1.39 mg/kg ตามลำดับ)

Table 7 The concentration of macro plant nutrients, Zn and B in the stalk of sugarcane at 12 months

Treatments	Total N (%)	Total P (%)	Total K (%)	Total Zn (mg/kg)	Total B (mg/kg)
T_1	$0.134^{c1/}$	$0.022^{f1/}$	$0.176^{d1/}$	$1.93^{g1/}$	$1.39^{g1/}$
T_2	0.312^{a}	0.053^{e}	0.469^{b}	4.85^{e}	4.12^{de}
T_3	0.322^{a}	0.087^{a}	0.489^{a}	5.56^{d}	4.36^{d}
T_4	0.315^{a}	0.076^{bc}	0.476^{ab}	6.74^{c}	4.89^{c}
T_5	0.318^{a}	0.081^{ab}	0.480^{ab}	12.63^{a}	9.42^{a}
T_6	0.308^{a}	0.071^{bcd}	0.466^{b}	3.26^{f}	3.51^{f}
T_7	0.261^{b}	0.061^{de}	0.430^{c}	3.59^{f}	3.75^{ef}
T_8	0.268^{b}	0.068^{cd}	0.433^{c}	8.43^{b}	6.53^{b}
F-test	**	**	**	**	**
CV (%)	12.78	11.87	10.39	11.45	10.29

Notes $^{1/}$ means within the same column followed by the same letter indicate no statistical difference by DMRT
** indicates significant difference at $P< 0.01$

จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นให้ข้อสังเกตว่าการใส่ปุ๋ยเคมีชนิดเม็ดธรรมดา (T_3) มีแนวโน้มให้ ผลผลิต และองค์ประกอบผลผลิต รวมทั้งความเข้มข้นของธาตุอาหารหลัก (N, P และ K) ที่สะสมในลำของอ้อยใกล้เคียงกับการใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรใหม่, T_5) และการใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรเดิม, T_4) แม้ว่าการใส่ปุ๋ยเคมีชนิดเม็ดธรรมดา (T_3) มีปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมมากกว่าปริมาณธาตุอาหารหลักของ T_5 และ T_4 เท่ากับ 3.18, 2.02 และ 2.02 เท่า ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยมีผลดีต่อการเพิ่มผลผลิต

และองค์ประกอบผลผลิต รวมทั้งความเข้มข้นของธาตุอาหารหลักที่สะสมในลำของอ้อย เพราะการใช้ปุ๋ยประเภทนี้ช่วยลดการสูญเสียธาตุอาหารในปุ๋ยเคมีที่ใส่ลงดินได้อย่างมีนัยสำคัญ เช่น การลดการสูญเสียไนโตรเจนในดินโดยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification process) ได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปุ๋ยเคมีไนโตรเจนประเภทละลายเร็ว (Morgan, 2009; Zwieten *et al*., 2016) เนื่องจากกลไกการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย จะดูดซึมน้ำและความชื้นในดินผ่านเปลือกที่หุ้มเม็ดเข้าไปในเม็ดปุ๋ยแล้วละลายตัวปุ๋ยเกิดเป็นสารละลายเกลือที่เข้มข้นภายในเปลือกของปุ๋ยแต่ละเม็ด ในสภาพเช่นนี้จะทำให้เกิดความดันออสโมซิส (osmotic pressure) ขึ้นภายในและเมื่อมีความดันสูงจนถึงระดับหนึ่ง จะมีผลทำให้น้ำปุ๋ยในรูปสารละลายค่อย ๆ แพร่ซึมผนังเปลือกเม็ดปุ๋ยที่ปริร้าวออกมาภายนอกอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอเป็นระยะเวลานาน ซึ่งพืชสามารถดูดไปใช้ประโยชน์ได้ (ปิยะ, 2538; วิยงค์ และคณะ, 2557) นอกจากนี้ การใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรใหม่) มีแนวโน้มให้ผลผลิต และองค์ประกอบผลผลิต รวมทั้งความเข้มข้นของธาตุสังกะสี และโบรอนที่สะสมในลำของอ้อยมากกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อย (สูตรเดิม) และการใส่ปุ๋ยเคมีชนิดเม็ดธรรมดา ตามลำดับ โดยผลการทดลองสอดคล้องกับผลการวิจัยที่รายงานว่าการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับสังกะสี (วรัญญา และคณะ, 2562) และโบรอน (ยศวดี และคณะ, 2562) มีแนวโน้มให้ผลผลิต องค์ประกอบผลผลิต ความเข้มข้นของธาตุสังกะสี และโบรอนที่สะสมในท่อนลำอ้อยมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใส่ปุ๋ยเคมีอย่างเดียว ซึ่งผลการทดลองจะเด่นชัดเมื่อมีการปลูกทดสอบกับอ้อยในดินที่มีปริมาณสังกะสีและโบรอนในระดับต่ำ

สรุปผลการวิจัย

การใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 อัตรา 50 กิโลกรัม/ไร่/ครั้ง ที่อายุ 30 และ 90 วันหลังปลูก และปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0 อัตรา 20 กิโลกรัม/ไร่ ที่อายุ 90 วันหลังปลูก (T_3) มีผลให้ผลผลิตอ้อยสด น้ำหนักต่อลำ เส้นผ่านศูนย์กลางลำ CCS และปริมาณความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจนที่สะสมในลำของอ้อยมากที่สุด ไม่แตกต่างกับการใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยสูตร 12-12-12 (สูตรใหม่) อัตรา 66 กิโลกรัม/ไร่/ครั้ง ที่อายุ 30 วันหลังปลูก (T_5) การใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยสูตร 12-12-12 (สูตรเดิม) อัตรา 66 กิโลกรัม/ไร่/ครั้ง ที่อายุ 30 วันหลังปลูก (T_4) และการใส่ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดิน (T_2) นอกจากนี้ T_3 ยังมีผลให้ผลผลิตน้ำตาล และปริมาณความเข้มข้นของธาตุฟอสฟอรัสที่สะสมในลำของอ้อยมากที่สุด ไม่แตกต่างกับ T_5 ขณะที่ T_5 มีผลให้ปริมาณความเข้มข้นของธาตุสังกะสี และโบรอนที่สะสมในลำของอ้อยมากที่สุด รองลงมา คือ การใส่ปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยสูตร 12-12-12 (สูตรใหม่) อัตรา 33 กิโลกรัม/ไร่/ครั้ง ที่อายุ 30 วันหลังปลูก (T_8), T_4 และ T_3 ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยระหว่างศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2553. คำแนะนำการใช้ปุ๋ยกับพืชเศรษฐกิจ. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2558. คู่มือปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ทางดิน ระบบโสตทัศนูปกรณ์. คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

ณัฐภัทร ถาวรกิจการ ชัยสิทธิ์ ทองจู ธวัชชัย อินทร์บุญช่วย ทศพล พรพรหม และธีรยุทธ คล้ำชื่น. 2562. ผลของการจัดการปุ๋ยเคมีร่วมกับซิลิคอนต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของอ้อยตอ (ปีที่ 1) ที่ปลูกในชุดดินกำแพงแสน. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตรและการจัดการ 2(1): 68-81.

ทัศนีย์ อัตตะนันท์ และจงรักษ์ จันทร์เจริญสุข. 2542. แบบฝึกหัดและคู่มือปฏิบัติการวิเคราะห์ดินและพืช. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นาวา ทวิชาโรดม ปิยะ ดวงพัตรา ปิติ กันตังกุล และจุฑามาศ ร่มแก้ว. 2562. ประสิทธิผลทางการเกษตรและความคุ้มค่าในทางเศรษฐกิจของปุ๋ยเคมีเคลือบด้วยวัสดุนาโนที่ควบคุมการปลดปล่อยในอ้อย. วารสารแก่นเกษตร 47(2): 259-270.

ปิยะ ดวงพัตรา. 2538. หลักการและวิธีการใช้ปุ๋ยเคมี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2558. ธาตุอาหารพืช. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ยศวดี เม่งเอียด ภิญญาพัชญ์ มิ่งมิตร ชัยสิทธิ์ ทองจู ธวัชชัย อินทร์บุญช่วย จุฑามาศ ร่มแก้ว ชาลินี คงสุด ธรรมธวัช แสงงาม และธีรยุทธ คล้ำชื่น. 2562. การจัดการปุ๋ยร่วมกับโบรอนต่อผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของอ้อยที่ปลูกในชุดดินกำแพงแสน, การประชุมวิชาการดินและปุ๋ยแห่งชาติครั้งที่ 6 “ดิน: กำเนิดของอาหารเพื่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม”, นครปฐม. น. 54-68.

วรัญญา เอมถมยา นัฐพร กลิ่นหอม ชัยสิทธิ์ ทองจู ธวัชชัย อินทร์บุญช่วย จุฑามาศ ร่มแก้ว ชาลินี คงสุด ธรรมธวัช แสงงาม และธีรยุทธ คล้ำชื่น. 2562. การจัดการปุ๋ยร่วมกับสังกะสีต่อผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของอ้อยที่ปลูกในชุดดินกำแพงแสน, การประชุมวิชาการดินและปุ๋ยแห่งชาติครั้งที่ 6 “ดิน: กำเนิดของอาหารเพื่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม”, นครปฐม. น. 69-82.

วิยงค์ กังวานศุภมงคล สุวัชชัย จรัสโสภณ ภาวิณี พงษ์วันธนกร วิรุฬห์มงคล กนิษฐา บุญภาวาณิชกุล และกรรณิกา สิทธิสุวรรณกุล. 2557. กรรมวิธีการเตรียมเม็ดปุ๋ยเคมีจากการเคลือบด้วยสารเคลือบชนิดโพลิเมอร์-นาโนเคลย์คอมพอสิทและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกรรมวิธีดังกล่าว. สิทธิบัตรไทย เลขที่ 1401003878.

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2557. กรรมวิธีการเตรียมเม็ดปุ๋ยเคมีจากการเคลือบด้วยสารเคลือบชนิดโพลิเมอร์-นาโนเคลย์คอมพอสิทและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกรรมวิธีดังกล่าว. สิทธิบัตรไทย เลขที่ 1401003878.

Bhanuvally, M., Y.M. Ramesha and H. Yogeeshappa. 2017. Effect of slow releasing nitrogen fertilizers on growth and yield of sugarcane. App. Sci. 6: 570-577.

Garrett, J., B. Tubana, S. Kwakye, W. Paye, F.B. Agostinho, D. Forestieri, M.S. Daren and M. Martins. 2017. Controlled release nitrogen fertilizer and application timimg: soil N, leaf N and yield respond in sugarcane. Proceeding of Managing Global Resources for a Secure Future 2017 Annual meeting, USA.

Lindsay, W.L. and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Sci. Am. J. 42: 421-428.

Meade, G.P. and J.C.P. Chen. 1977. Cane Sugar Handbook. 10th ed. John Wiley and Sons, New York.

Morgan, K.T. 2009. Improved fertilizer use efficiency with controlled release sources on sandy soils in South Florida. Southwest Florida Research and Education Center, Florida.

Mullen, R.W. 2011. Nutrient cycling in soils: nitrogen. pp. 67-78. *In* Hatfield, J.L., Sauer, T.J. (Eds.), Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Medison, Wl.

Soil Survey Staff. 2003. Key to Soil Taxonomy: Ninth Edition. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C.

Verburg, K., T.H. Muster, Z. Zhao, J.S. Biggs, P.J. Thorburn, J. Kandulu, K, Witter-Schmid, G. McLachlan, K.L. Bristow, J. Poole, M.F.T. Wong and J.I. Mardell. 2017. Roles of controlled release fertilizer in Australian sugarcane system: final report 2014/11. Sugar Research Australia Ltd, Australia.

Zwieten, L.V., J. Rush, T.J. Rose, S. Joseph, R. Beattie, S. Donne, G. Butler, R. Quirk, S. Kimber and S. Morris. 2016. Assessing controlled release and deep placement N fertilizer technologies in subtropical sugarcane, Proceeding of the 2016 International Nitrogen Initiative Conference. Melbourne, Australia. pp. 1-4.