การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ (*Pomacea canaliculata*) และใช้ทดแทนปุ๋ยฟอสฟอรัสในการปลูกอ้อย (*Saccharum* spp.)

SYNTHESIS OF CALCIUM PHOSPHATE FROM GOLDEN APPLE SNAIL (*Pomacea canaliculata*) SHELL TO REPLACE COMMERCIAL PHOSPHORUS FERTILIZER USED IN SUGARCANE (*Saccharum* spp.) CULTIVATION

สมเกียรติ สีสนอง

SOMKIAT SEESANONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาเกษตรศาสตร์

คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL–2019–AG–D–064–024

การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ (*Pomacea canaliculata*) และใช้ทดแทนปุ๋ยฟอสฟอรัสในการปลูกอ้อย (*Saccharum* spp.)

SYNTHESIS OF CALCIUM PHOSPHATE FROM GOLDEN APPLE SNAIL (*Pomacea canaliculata*) SHELL TO REPLACE COMMERCIAL PHOSPHORUS FERTILIZER USED IN SUGARCANE (*Saccharum* spp.) CULTIVATION

สมเกียรติ สีสนอง

SOMKIAT SEESANONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาเกษตรศาสตร์

คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL–2019–AG–D–064-024

SYNTHESIS OF CALCIUM PHOSPHATE FROM GOLDEN APPLE SNAIL (*Pomacea canaliculata*) SHELL TO REPLACE COMMERCIAL PHOSPHORUS FERTILIZER USED IN SUGARCANE (*Saccharum* spp.) CULTIVATION

SOMKIAT SEESANONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

DOCTOR OF PHILOSOPHY IN AGRICULTURE

FACULTY OF AGRICULTURAL TECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

KMITL–2019–AG–D–064-024

COPYRIGHT 2019

FACULTY OF AGRICULTURAL TECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ (*Pomacea canaliculata*) และใช้ทดแทนปุ๋ยฟอสฟอรัสในการปลูกอ้อย (*Saccharum* spp.)
นักศึกษา	นายสมเกียรติ สีสนอง
รหัสประจำตัว	56604001
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	เกษตรศาสตร์
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. จำรูญ เล้าสินวัฒนา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่เพื่อใช้ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีสำหรับการปลูกอ้อย มีรูปแบบการสังเคราะห์ 2 วิธีการ คือ การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่อย่างง่าย และการสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่อนุภาคขนาดเล็ก จากการวิเคราะห์สารประกอบที่สังเคราะห์ได้จากทั้งสองวิธีการ พบว่า วิธีการแรกสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้อยู่ในรูปโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรท (MCPM) และวิธีการที่สองอยู่ในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรท (DCPD) มีปริมาณฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ (P_2O_5) ร้อยละ 55.91 และ 28.32 ตามลำดับ ความสามารถในการละลายได้ใน 2% citric acid เท่ากับ 91.42 และ 74.02 % ตามลำดับ ในการทดลองเพื่อใช้กับการปลูกอ้อยได้เลือก MCPM ใช้ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีมาตรฐานสูตร 15-15-15 อัตรา 100 kg/ไร่ ในอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 ที่ปลูกในพื้นที่ลุ่ม และอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 ที่ปลูกในพื้นที่ดอน โดยทำเป็นปุ๋ยผสมแบบคลุกเคล้า (ปุ๋ยเปลือกหอย) ที่ประกอบด้วยปุ๋ยยูเรีย, MCPM และโพแทสเซียมคลอไรด์ เท่ากับ 32.60, 27.40 และ 25.00 kg ตามลำดับ เป็นต้นทุนของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอย เท่ากับ 1,620.00 และ 1,214.44 บาท/ไร่ ตามลำดับ

ผลการศึกษาการใช้ปุ๋ยทั้งสองชนิดในการปลูกอ้อยตอในฤดูการการผลิต 2559/2560 ในพื้นที่ลุ่มที่ปลูกอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 พบว่า สมบัติของดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ของสมบัติดินด้าน pH, available P และ exchangeable Ca โดยการใส่ปุ๋ยเปลือกหอยมีการสะสมในดินสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมี คือ pH 5.93 และ 6.24 available P 62.07 และ 53.07 mg/kg exchangeable Ca 406.67 และ 354.09 mg/kg ในปุ๋ยเปลือกหอยและปุ๋ยเคมีตามลำดับ ส่วน EC, OM, exchangeable K และ Mg ของดิน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) ระหว่างปุ๋ยทั้งสองชนิด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 189.88 µS/cm, 1.86 %, 57.90 และ 47.68 mg/kg

ตามลำดับ การเจริญเติบโตของอ้อยที่บันทึกในช่วงอายุ 4 และ 8 เดือน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05) ในทุกพารามิเตอร์ที่ศึกษา คือ ความสูงต้น เส้นผ่าศูนย์กลางลำ จำนวนต้นต่อไร่ และความเขียวใบ มีค่าเฉลี่ยที่ 8 เดือน เท่ากับ 2.64 m, 25.90 mm, 11,028.25 ต้น/ไร่ และ 42.49 SPAD value ตามลำดับ การสะสมธาตุอาหารพืชในใบอ้อยในช่วงอายุ 4 และ 8 เดือน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05) ของชนิดปุ๋ยต่อปริมาณของ N, P, K และ Mg โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 8 เดือน เท่ากับ 1.77, 0.19, 1.22 และ 1.84 % ตามลำดับ ส่วน Ca ในใบ พบว่าทั้งอายุอ้อย 4 และ 8 เดือน การให้ปุ๋ยเปลือกหอย (0.20 และ 0.17 % ตามลำดับ) มีการสะสมในใบอ้อยสูงกว่าการให้ปุ๋ยเคมี (0.12 และ 0.11 % ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ในพื้นที่ดอนซึ่งปลูกอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 ผลการทดลองการใช้ปุ๋ยดังกล่าว พบว่าสมบัติของดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05) ทุกพารามิเตอร์ที่ศึกษาจากปัจจัยชนิดของปุ๋ยที่ให้ แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) ในปัจจัยอายุของอ้อยตอในสมบัติ pH ของดิน โดยพื้นที่อ้อยตอ 1 มี pH ของดินสูงกว่าในพื้นที่อ้อยตอ 2 คือ pH 6.35 และ 6.05 ตามลำดับ ส่วน EC, OM, available P, exchangeable K, Ca และ Mg ของดิน ไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 131.75 µS/cm, 1.83 %, 96.90, 126.16, 146.51 และ 50.58 mg/kg ตามลำดับ การเจริญเติบโตของอ้อยที่บันทึกในช่วงอายุ 4 และ 8 เดือน มีเฉพาะจำนวนต้นต่อไร่ช่วงอายุ 8 เดือน ที่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) ระหว่างชนิดของปุ๋ยที่ให้ โดยการให้ปุ๋ยเปลือกหอยมีจำนวนต้นต่อไร่มากกว่าปุ๋ยเคมี คือ 13,585.03 และ 12,961.95 ต้น/ไร่ ตามลำดับ ส่วนความสูงต้น เส้นผ่าศูนย์กลางลำ และความเขียวใบ ไม่แตกต่างกันโดยมีค่าเฉลี่ยที่ 8 เดือน เท่ากับ 2.40 m, 26.93 mm และ 43.78 SPAD value ตามลำดับ การสะสมธาตุอาหารพืชในใบอ้อยช่วงอายุ 4 และ 8 เดือน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05) ของชนิดปุ๋ยที่ให้ต่อปริมาณของ N, P, K และ Mg มีค่าเฉลี่ยที่ 8 เดือนเท่ากับ 1.76, 0.19, 1.35 และ 1.74 % ตามลำดับ ส่วน Ca พบว่าทั้งอายุอ้อย 4 และ 8 เดือน การให้ปุ๋ยเปลือกหอย (0.20 และ 0.22 % ตามลำดับ) มีการสะสมในใบอ้อยสูงกว่าการให้ปุ๋ยเคมี (0.13 และ 0.12 % ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ผลผลิตอ้อยที่เก็บเกี่ยวเมื่ออายุ 12 เดือน พบว่า ผลผลิตที่ได้จากการปลูกอ้อยที่มีการให้ปุ๋ยทั้งสองชนิดไม่ว่าจะเป็นปุ๋ยเคมี หรือปุ๋ยเปลือกหอยไม่มีความแตกต่างกันทั้งในด้านปริมาณผลผลิตอ้อยสดและคุณภาพของอ้อย (commercial cane sugar, CCS) โดยได้ผลผลิตอ้อยตอ 1 เท่ากับ 20.7-21.58 ตัน/ไร่ อ้อยตอ 2 เท่ากับ 19.83-21.25 ตัน/ไร่ อ้อยตอ 3 เท่ากับ 18.56-18.84 ตัน/ไร่ อายุของอ้อยตอที่มากขึ้นทำให้ผลผลิตและคุณภาพผลผลิตของอ้อยลดลง การศึกษานี้มีกำไรจากการปลูกอ้อยตอ 1 อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 เฉลี่ยเท่ากับ 17,793.69, 16,660.14 และ 13,474.74 บาท/ไร่ อัตราผลตอบแทนต่อค่าลงทุนในการปลูกอ้อยตอ 1 อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 เฉลี่ยเท่ากับ 2.64, 2.48 และ 2.21 ตามลำดับ

Thesis	Synthesis of Calcium Phosphate from Golden Apple Snail (*Pomacea canaliculata*) Shell to Replace Commercial Phosphorus Fertilizer Used in Sugarcane (*Saccharum* spp.) Cultivation
Student	Mr. Somkiat Seesanong
Student ID.	56604001
Degree	Doctor of Philosophy
Program	Agriculture
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chamroon Laosinwattana

ABSTRACT

This thesis studied the synthesis calcium phosphate from golden apple snail shells for replacement chemical fertilizer used in sugarcane cultivation. The two synthesis methods were simple calcium phosphate synthesized from golden apple snail shells and calcium phosphate synthesized from micro particles shell. Base on the analysis of synthesized compounds from both methods, it was found that the first method resulted in calcium phosphate compound in the form of monocalcium phosphate monohydrate (MCPM) and the second method was in the form of dicalcium phosphate dihydrate (DCPD) with available phosphate (P_2O_5) contents at 55.91 and 28.32%, respectively, solubility in 2% citric acid were 91.42 and 74.02%, respectively. In the experiment of sugarcane cultivation, MCMP was used for substitute phosphorus containing in standard commercial chemical fertilizer grade 15-15-15 with the rate of 100 kg/rai for the second ratoon and the third ratoon grown in lowland area, as well as the first ratoon and the second ratoon grown in upland area. Those shell fertilizers contained urea fertilizer, MCPM, potassium chloride at 32.60, 27.40 and 25.00 kg, respectively, which were equal to commercial chemical fertilizer grade 15-15-15. The cost of commercial chemical fertilizer and golden apple snail shell fertilizer were 1,620.00 and 1,214.44 baht/rai, respectively.

The study using both fertilizers in sugarcane cultivation in sugarcane production season 2017/2018 with the second ratoon and the third ratoon grown in lowland area revealed that the properties of cultivated soil after sugarcane harvesting were different ($P<0.05$) in pH, available P, and soil exchangeable Ca. The shell fertilizer was accumulated in the soil higher than that of

chemical fertilizer, which the soil parameters in shell fertilizer and chemical fertilizer were pH 5.93 and 6.24, available P 62.07 and 53.07 mg/kg, exchangeable Ca 406.67 and 354.09 mg/kg, respectively. The EC, OM, exchangeable K and Mg of soil were not significant (P>0.05) between both types of the fertilizers which the average soil parameters were 189.88µS/cm, 1.86%, 57.90 and 47.68 mg/kg, respectively. The growths of sugarcane measured at the age of 4 and 8 months were not significant (P>0.05) in all parameters studied; height, stem diameter, number of tree per rai and leave greenness which the average values of 8 months were 2.64 m, 25.90 mm, 11,028.25 tree/rai and 42.49 SPAD value, respectively. The nutrient accumulation in sugarcane leaves during the age of 4 and 8 months were not significant (P>0.05) of fertilizer types on the amount of N, P, K and Mg which the average parameters of 8 months were 1.77, 0.19, 1.22 and 1.84%, respectively. However, calcium accumulated in sugarcane leaves for both 4 and 8 months when utilization shell fertilizer (0.20 and 0.17% respectively) was significantly (P<0.05) higher than that of chemical fertilizer (0.12 and 0.11% respectively).

The sugarcane cultivation using both fertilizers in sugarcane cultivation with the first ratoon and the second ratoon grown in upland area found that the properties of cultivated soil after sugarcane harvesting were not significant different (P>0.05) in all parameters except the age of sugarcane stubble which there was significant different (P<0.05) aspect of pH in soil. The pH in soil of the area cultivated the first ratoon was higher than that of the second ratoon which the soil pH were 6.35 and 6.05, respectively. The average of EC, OM, available P, exchangeable K, Ca and Mg of soil were 131.75 µS/cm, 1.83%, 96.90, 126.16, 146.51 and 50.58 mg/kg, respectively. The growths of sugarcane measured at the age of 4 and 8 months. As the result show that only the number of tree per rai at the age of 8 months had different (P<0.05) between both types of the fertilizers. The value of shell fertilizer was higher than that of chemical fertilizer which the values were 13,585.03 and 12,961.95 tree/rai, respectively. The height, the stem diameter and the leave greenness at the age of 8 months were 2.40 m, 26.93 mm and 43.78 SPAD value, respectively. The nutrient accumulation in sugarcane leaves using fertilizer types on the amount of N, P, K and Mg during the age of 4 and 8 months had not significant (P>0.05), which the average values of 8 months were 1.76, 0.19, 1.35 and 1.74%, respectively. However, calcium in sugarcane leaves for both 4 and 8 months when utilization shell fertilizer (0.20 and 0.22% respectively) was significantly (P<0.05) higher than that of chemical fertilizer (0.13 and 0.12% respectively).

The production of harvested sugarcane at the age of 12 months was not significant ($P>0.05$) between parameters in both quantity of fresh sugarcane and the quality of sugarcane or commercial cane sugar (CCS). The yield of the first ratoon was 20.7-21.58 ton/rai, the second ratoon was 19.83-21.25 ton/rai and yield of the third ratoon was 18.56-18.84 ton/rai. When the age of sugarcane stubble increased, the yield and the quality was decreased. From this study, the average profit of the first ratoon, the second ratoon and of the third ratoon of sugarcane were 17,793.69, 16,660.14 and 13,474.74 baht/rai, respectively. The benefit/cost ratio of the first ratoon, the second ratoon and the third ratoon of sugarcane were average at 2.64, 2.48 and 2.21, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณาจาก รศ.ดร.จำรูญ เล้าสินวัฒนา เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยชี้แนะ ให้คำปรึกษาที่ดี และแนวทางแก้ไขปัญหาในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อำมร อินสังข์ ผศ.ดร.กัญจนา แซ่เตียว และ ผศ.ดร.มณฑินี ธีรารักษ์ กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ธนัชสัณห์ พูนไพบูลย์พิพัฒน์ รศ.ดร.อำมร อินสังข์ ผศ.ดร.กัญจนา แซ่เตียว และ ผศ.ดร.มณฑินี ธีรารักษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.บรรจง บุญชม รศ.ดร.นงนุช เลาหะวิสุทธิ์ ผศ.ดร.อัจฉรี เรืองเดช รศ.ดร.สมชาย หวังวิบูลย์กิจ และดร.วิมลมาศ บุญมี ที่ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จ ลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ที่ให้การช่วยเหลือ คำแนะนำและเป็นกำลังใจขณะทำการทดลอง

ขอขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ ที่เป็นทุก ๆ อย่าง ทั้งยังคอยอบรมสอนสั่งแก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณญาติพี่น้องที่ให้กำลังใจมาตลอด

สมเกียรติ สีสนอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	VI
สารบัญ	VII
สารบัญตาราง	XIII
สารบัญภาพ	XVI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต	3
2.1.1 สารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟต	4
2.1.2 สารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟต	4
2.1.3 สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต	5
2.2 การสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต	6
2.2.1 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟต	6
2.2.1.1 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตด้วยปฏิกิริยาของแข็ง(solid state reaction)	6
2.2.1.2 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตด้วยวิธีแบบเปียก (wet method)	6
2.2.1.3 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal method)	6
2.2.2 การสังเคราะห์โมโนแคลเซียมฟอสเฟต	7
2.2.3 การสังเคราะห์ไดแคลเซียมฟอสเฟต	7

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.4 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟต.. 7

2.3 วัสดุปูนจากเปลือกของสัตว์น้ำ.. 9

2.4 วัสดุปูนจากเปลือกหอยเชอรี่.. 10

2.5. ความสำคัญของธาตุฟอสฟอรัสในการเกษตร.. 11

2.6 การผลิตปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟต.. 12

2.6.1 ซูเปอร์ฟอสเฟตธรรมดา (ordinary superphosphate).. 12

2.6.2 ดับเบิลซูเปอร์ฟอสเฟต (double superphosphate).. 13

2.6.3 ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (triple superphosphate).. 13

2.7. การใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอ้อย... 13

2.8 อุตสาหกรรมอ้อยของประเทศไทย.. 15

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.. 18

3.1 สารเคมี.. 18

3.2 อุปกรณ์... 19

3.3 วิธีดำเนินการ.. 20

3.3.1 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่.. 20

3.3.1.1 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีอย่างง่าย............ 20

3.3.1.2 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีการใช้อนุภาคขนาดเล็ก............ 21

3.3.2 การสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่เพื่อใช้ในการทดลอง............ 22

3.3.3 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา.. 23

3.3.3.1 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา)................... 23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3.2 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่ดอน (สภาพไร่) 27

3.3.3.3 การบันทึกข้อมูล 30

3.3.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ 33

3.3.3.5 ประเมินต้นทุนการผลิต และผลตอบแทนจากการปลูกอ้อย 33

3.4 ระยะเวลาดำเนินงาน 34

3.5 สถานที่ทำการวิจัย 34

บทที่ 4 ผลการทดลอง 35

4.1 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีอย่างง่าย 35

4.1.1 สมบัติทางเคมีของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต 35

4.1.2 โครงสร้างผลึกของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต 37

4.1.3 โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต 38

4.1.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต.. 39

4.2 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีอนุภาคขนาดเล็ก 40

4.2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต 40

4.2.2 โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต 41

4.2.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต.. 42

4.2.4 สมบัติทางความร้อนของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต 43

4.2.5 การละลายของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ 44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีในการปลูกอ้อย.................... 46

4.3.1 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา).................... 46

4.3.1.1 สมบัติของดินในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา) ก่อนการใส่ปุ๋ยของการทดลอง.............. 46

4.3.1.2 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อสมบัติดินหลังเก็บเกี่ยวอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ลุ่ม.................... 46

4.3.1.3 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตของอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ลุ่ม.................... 50

4.3.1.4 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณธาตุอาหารพืชในใบอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ลุ่ม.................... 52

4.3.1.5 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตอ้อยในพื้นที่ลุ่ม.................... 56

4.3.1.6 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อองค์ประกอบคุณภาพผลผลิตของอ้อยในพื้นที่ลุ่ม.................... 58

4.3.2 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่ดอน (สภาพไร่) 60

4.3.2.1 สมบัติของดินในพื้นที่ดอน (สภาพไร่) ก่อนการใส่ปุ๋ยของการทดลอง............ 60

4.3.2.2 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อสมบัติดินหลังเก็บเกี่ยวอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ดอน.................... 60

4.3.2.3 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ดอน.................... 64

4.3.2.4 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณธาตุอาหารพืชในใบอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ดอน.................... 67

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2.5 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตอ้อย ในพื้นที่ดอน.......... 70

4.3.2.6 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อองค์ประกอบคุณภาพผลผลิตของอ้อย ในพื้นที่ดอน.......... 72

4.4 ต้นทุนการผลิต และผลตอบแทนจากการปลูกอ้อย.......... 74

บทที่ 5 วิจารณ์ผลการวิจัย.......... 78

5.1 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีอย่างง่าย.......... 78

5.2 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีอนุภาคขนาดเล็ก.......... 80

5.3 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา.......... 82

5.3.1 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา).......... 82

5.3.1.1 สมบัติของดินในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา) ก่อนการการทดลอง.......... 82

5.3.1.2 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุอ้อยตอต่อสมบัติทางเคมีของดินหลังเก็บเกี่ยวอ้อย 83

5.3.1.3 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อยต่อการเจริญเติบโตของอ้อย.......... 86

5.3.1.4 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อยต่อปริมาณธาตุอาหารพืชในใบอ้อย.......... 87

5.3.1.5 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุอ้อยต่อองค์ประกอบคุณภาพผลผลิตของอ้อย.......... 87

5.3.2 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่ดอน (สภาพไร่).......... 88

5.3.2.1 สมบัติของดินในพื้นที่ดอน (สภาพไร่) ก่อนการการทดลอง.......... 88

5.3.2.2 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุอ้อยตอต่อสมบัติทางเคมีของดินหลังเก็บเกี่ยวอ้อย 89

5.3.2.3 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อยต่อการเจริญเติบโตของอ้อย.......... 92

5.3.1.4 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อยต่อปริมาณธาตุอาหารพืชในใบอ้อย.......... 93

5.3.1.5 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุอ้อยต่อองค์ประกอบคุณภาพผลผลิตของอ้อย.......... 93

5.4 ต้นทุนการผลิต และผลตอบแทนจากการปลูกอ้อย.......... 94

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.. 96

6.1 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีอย่างง่าย............................ 96

6.2 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีอนุภาคขนาดเล็ก............... 96

6.3 การใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีในการปลูกอ้อย.. 97

บรรณานุกรม.. 99

ประวัติผู้เขียน.. 111

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตในรูปต่าง ๆ	3
2.2	สมบัติทางกายภาพของไตรแคลเซียมฟอสเฟต	6
2.3	ปริมาณร้อยละ $CaCO_3$ ในเปลือกหอยเชอรี่	11
3.1	การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของตัวอย่างเปลือกหอยเชอรี่	20
3.2	การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตด้วยวิธีอย่างง่าย	21
3.3	การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตวิธีการใช้อนุภาคขนาดเล็ก	21
4.1	องค์ประกอบทางเคมี และความบริสุทธิ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตและสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence; XRF) และเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของ $CaCO_3$ (CC) และ $Ca(H_2PO_4)_2{\cdot}H_2O$ (MCPM)	36
4.2	ร้อยละของการละลายและปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่	45
4.3	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อ pH และ EC ของดินก่อนและหลังการทดลองในพื้นที่ลุ่ม	47
4.4	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณอินทรียวัตถุ และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของดินก่อนและหลังการทดลองในพื้นที่ลุ่ม	48
4.5	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อโพแทสเซียม แคลเซียม และ แมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินก่อนและหลังการทดลองในพื้นที่ลุ่ม	49
4.6	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อความสูงต้นและเส้นผ่าศูนย์กลางของลำอ้อยหลังจากการให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ลุ่ม	51
4.7	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อจำนวนต้นและความเขียวใบของอ้อยหลังจากการให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ลุ่ม	52
4.8	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมดของใบอ้อยหลังจากให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ลุ่ม	53

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.9	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณโพแทสเซียมและแคลเซียมทั้งหมดของใบอ้อยหลังจากการให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ลุ่ม	55
4.10	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อแมกนีเซียม (%) ของใบอ้อยหลังจากให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ลุ่ม	55
4.11	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตอ้อยจากการเก็บเกี่ยวที่อายุ 12 เดือนในพื้นที่ลุ่ม	57
4.12	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตอ้อยจากการเก็บเกี่ยวที่อายุ 12 เดือนในพื้นที่ลุ่ม	58
4.13	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อองค์ประกอบคุณภาพผลผลิตของอ้อยจากการเก็บเกี่ยวที่อายุ 12 เดือนในพื้นที่ลุ่ม	59
4.14	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อ pH และ EC ของดินก่อนและหลังการทดลองในพื้นที่ดอน	61
4.15	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณอินทรียวัตถุ และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของดินก่อนและหลังการทดลองในพื้นที่ดอน	62
4.16	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อ โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินก่อน และหลังการทดลองในพื้นที่ดอน	64
4.17	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อความสูงต้นและเส้นผ่าศูนย์กลางของลำอ้อยหลังจากการให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ดอน	66
4.18	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อจำนวนต้นและความเขียวใบของอ้อยหลังจากการให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ดอน	66
4.19	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมดของใบอ้อยหลังจากให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ดอน	68
4.20	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมทั้งหมดของใบอ้อย หลังจากการให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ดอน	69

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.21	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตอ้อยจากการเก็บเกี่ยวที่อายุ 12 เดือนในพื้นที่ดอน	71
4.22	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตอ้อยจากการเก็บเกี่ยวที่อายุ 12 เดือนในพื้นที่ดอน	72
4.23	ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อองค์ประกอบคุณภาพผลผลิตของอ้อยจากการเก็บเกี่ยวที่อายุ 12 เดือนในพื้นที่ดอน	73
4.24	ต้นทุนในการผลิตอ้อยในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา) ฤดูการผลิต 2559/2560 (บาท/ไร่)	75
4.25	ต้นทุนในการผลิตอ้อยในพื้นที่ดอน (สภาพไร่) ฤดูการผลิต 2559/2560 (บาท/ไร่)	76
4.26	ผลตอบแทนที่ได้จากการปลูกอ้อยในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา)	77
4.27	ผลตอบแทนที่ได้จากการปลูกอ้อยในพื้นที่ดอน (สภาพไร่)	77

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 ลักษณะของเปลือกหอยเชอรี่และวิธีการวัดขนาด ความสูงของเปลือก (SH) ความยาวของเปลือก (SL) และความกว้างของเปลือก (SW) 10

3.1 ประเภทเนื้อดินของพื้นที่ทดลอง.. 29

3.2 ความชื้น ฝน และการให้น้ำแก่อ้อยในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา)... 26

3.3 ความชื้น ฝน และการให้น้ำแก่อ้อยในพื้นที่ดอน (สภาพไร่)... 29

3.4 ตำแหน่งการวัดข้อมูลของอ้อย.. 31

4.1 เปลือกหอยเชอรี่บดละเอียดมีลักษณะเป็นผงสีขาวขนาด 100 และ 400 mesh............... 35

4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ของผง $CaCO_3$ (CC) และ $Ca(H_2PO_4)_2{\cdot}H_2O$ (MCPM) ที่เตรียมได้... 37

4.3 ผลการวัดสเปกตรัม FT-IR ของ (a) ผง $CaCO_3$ (CC) และ (b) $Ca(H_2PO_4)_2{\cdot}H_2O$ (MCPM) ที่เตรียมได้.. 39

4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ของผง $CaCO_3$ และ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ ที่เตรียมได้.. 40

4.5 ผลการวัดสเปกตรัม FT-IR ของผง $CaCO_3$และ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ ที่เตรียมได้............ 42

4.6 สัณฐานวิทยาของ (a) แคลเซียมคาร์บอเนต (CC) และ (b) โมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรท (MCPM) ที่เตรียมได้จากเปลือกหอยเชอรี่ 100 mesh (c) ผง $CaCO_3$ และ (b) $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ ที่เตรียมได้จากเปลือกหอยเชอรี่ 400 mesh........................ 43

4.7 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ (TG curve) ของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และไดแคลเซียมฟอสเฟตไฮเดรท ($CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$).. 45

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปุ๋ยเป็นปัจจัยพื้นฐานที่มีความสำคัญยิ่งในการผลิตภาคการเกษตร ทั้งยังเป็นปัจจัยที่จะส่งเสริมและเพิ่มประสิทธิผลให้แก่การเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืช และรักษาไว้ซึ่งความอุดมสมบูรณ์ของดินและทดแทนธาตุอาหารพืชที่สูญเสียจากพื้นที่เกษตรกรรม การใช้ปุ๋ยทางการเกษตรเพื่อการผลิตในปัจจุบันยังให้ความสำคัญต่อธาตุอาหารพืช 3 ชนิด ซึ่งเป็นธาตุอาหารหลัก คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม อยู่อย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอ้อย การผลิตเกือบทั้งหมดของประเทศไทยอยู่ในรูปแบบเกษตรสมัยใหม่ คือการเกษตรที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี ซึ่งได้จากการผลิตจากทรัพยากรที่มีอย่างจำกัดและหมดไป หากสามารถใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตปุ๋ยได้ ก็จะเป็นการใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่ามากขึ้น เปลือกหอยที่เหลือจากการบริโภคเนื้อ ซึ่งหอย นับได้ว่าเป็นอาหารจากการประมงมีความสำคัญด้านเศรษฐกิจการค้าที่สำคัญของโลก ปัจจุบันจากข้อมูลขององค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) ผลผลิตในกลุ่มสัตว์เปลือกแข็งโดยเฉพาะประเภทหอยมีผลผลิตจำนวน 16.9 ล้านตัน (FAO, 2018) ส่งผลให้มีของเหลือทิ้งจากเปลือกหอยจำนวนมากและเป็นปัญหาในการกำจัด เพราะจะใช้เวลาในการสลายตัวตามธรรมชาตินาน เนื่องจากองค์ประกอบหลักของเปลือกหอยคือ แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมการก่อสร้าง หรือสารเสริมที่ต้องการธาตุแคลเซียม ในทางการเกษตรก็มีความต้องการใช้แคลเซียมหลากหลายรูปแบบ เช่น เป็นวัสดุปรับปรุงดิน หรือใช้เป็นปุ๋ยในรูปขององค์ประกอบแคลเซียม ในประเทศไทยหอยเชอรี่มีการแพร่กระจายพันธุ์อย่างมากในพื้นที่ลุ่ม ซึ่งเป็นแหล่งปลูกข้าวของประเทศ และเป็นปัญหาศัตรูพืชด้วย จากความนิยมในการบริโภคเนื้อหอยเชอรี่ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เหลือเปลือกหอยที่เป็นภาระในการกำจัดมากขึ้นด้วย

อ้อย เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีพื้นที่ปลูกใน 47 จังหวัด โดยเป็นพื้นที่ปลูกอ้อยในปี 2560 ประมาณ 11.54 ล้านไร่ ทำให้มีผลผลิตกว่า 135 ล้านตัน/ปี ผลผลิตเฉลี่ยทั้งประเทศประมาณ 11.68 ตัน/ไร่ และจังหวัดนครราชสีมามีพื้นที่ปลูกอ้อยกว่า 6.72 แสนไร่ มากเป็นอันดับที่ 5 ของประเทศ และผลผลิตเฉลี่ยก็ไม่ต่างจากค่าเฉลี่ยทั้งประเทศ (สำนักนโยบายอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย, 2561) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลผลิตของไทยกับประเทศที่ผลิตอ้อยและส่งน้ำตาลออกรายสำคัญของโลก เช่น ออสเตรเลียและบราซิล (14.40 และ 11.91 ตัน/ไร่) นับว่าต่ำกว่าออสเตรเลียมาก โดยที่ประเทศไทยมีสภาพ

ภูมิอากาศเหมาะสมต่อการปลูกอ้อย ข้อจำกัดที่ทำให้ผลผลิตอ้อยของไทยต่ำนั้น เนื่องจากเกษตรกรส่วนใหญ่ปลูกอ้อยโดยขาดการจัดการองค์ความรู้ในการผลิตอ้อยด้านต่างๆ โดยเฉพาะการจัดการดิน และธาตุอาหารพืช ซึ่งเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ในการใช้ปุ๋ยอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพจะเป็นแนวทางหนึ่งของการจัดการแปลงเพาะปลูก เพื่อยกระดับของผลผลิต และลดต้นทุนในการผลิตอ้อย เพราะต้นทุนในการปลูกอ้อยนอกจากด้านแรงงานที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวทีมีค่าใช้จ่ายสูงที่สุด (18%) แล้ว ในส่วนของปัจจัยการผลิตของอ้อยส่วนใหญ่จะเป็นค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับปุ๋ยถึงกว่าร้อยละ 16 (1,600-1,800 บาทต่อไร่) (ชุลีพรและกาญจนา, 2555 ; ประสิทธิ, 2558) ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้จึงนำเปลือกหอยเชอรี่ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ภายในประเทศมาสังเคราะห์เพื่อให้ได้ปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟต และนำปุ๋ยที่ผลิตได้มาใช้เพื่อปลูกอ้อยพร้อมทั้งมีการจัดการในการผลิตอย่างเหมาะสมจะทำให้ได้ผลผลิตของอ้อยเพิ่มขึ้น เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายเรื่องปุ๋ยของเกษตรกร และเกษตรกรสามารถผลิตเองได้ก็จะทำให้เกิดความมั่นคงในด้านปัจจัยการผลิตที่เกษตรกรสามารถพึ่งพาตนเองได้ ซึ่งปริมาณปุ๋ยที่ใช้ในการปลูกอ้อยกว่าร้อยละ 90 ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ หากสามารถนำวัสดุเหลือใช้มาผลิตเป็นปุ๋ยนอกจากจะเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้แล้ว ยังสามารถลดปัญหาวัสดุเหลือใช้ในชุมชนได้อีกด้วย และสามารถสร้างการแข่งขันในอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลของประเทศให้สูงเพิ่มขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการสังเคราะห์ปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่

1.2.2 เพื่อศึกษาองค์ประกอบของปุ๋ยที่ผลิตจากเปลือกหอยเชอรี่

1.2.3 เพื่อศึกษาวิธีการผลิตปุ๋ยให้สามารถใช้ในการเกษตร

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของการใช้ปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนปุ๋ยเคมี ต่อปริมาณและคุณภาพของผลผลิตอ้อย

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงวิธีการผลิตปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ ที่มีปริมาณธาตุอาหารพืชที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อย และได้อ้อยที่มีผลผลิตสูงทั้งปริมาณและคุณภาพของอ้อย โดยมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง

บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต คือ สารประกอบหรือสินแร่ที่ประกอบไปด้วยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และอนุมูลของฟอสเฟตที่สำคัญ ได้แก่ ออโธฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) หรือไพโรฟอสเฟต ($P_2O_7^{4-}$) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งไอออนต่าง ๆ นี้สามารถก่อตัวขึ้นเป็นสารประกอบหรือสินแร่ที่มีโครงสร้างที่หลากหลาย เช่น โมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรท (MCPM) โมโนแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮดรัส (MCPA) ไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรท (DCPD) และไตรแคลเซียมฟอสเฟต (TCP) เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตในรูปต่างๆ

Ca/P molar ratio	Compound	Formula	Solubility at 25 °C -log(K_s)	Solubility at 25 °C g/L	pH
0.5	MCPM	$Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$	1.14	18	0.0-2.0
0.5	MCPA or MCP	$Ca(H_2PO_4)_2$	1.14	17	c
1.0	DCPD	$CaHPO_4.2H_2O$	6.59	0.088	2.0-6.0
1.0	DCPA or DCP	$CaHPO_4$	6.90	0.048	c
1.5	α-TCP	α-$Ca_3(PO_4)_2$	25.5	0.0025	c
1.5	β -TCP	β -$Ca_3(PO_4)_2$	28.9	0.0005	c

เมื่อ c คือ เสถียรที่อุณหภูมิ 100 °C

ที่มา: ดัดแปลงจาก Dorozhkin (2011)

สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์หลากหลายสาขา เนื่องจากเป็นสารประกอบที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย และมีประสิทธิภาพสูง จากตารางที่ 2.1 พบว่า สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยโมลของ Ca ต่อ P ที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.5 สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตในรูปโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรท (MCPM) และโมโนแคลเซียมฟอสเฟตแอนไฮดรัส (MCP) ละลายน้ำได้ดี ขณะที่สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตจะละลายน้ำได้น้อยลง เมื่อมีอัตราส่วนโดย

โมลของ Ca/P ตั้งแต่ 1.0 ขึ้นไป นอกจากนี้ยังพบว่าการเผาสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตเหล่านี้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200-2,000 ^{o}C จะทำให้โมเลกุลของสารประกอบอยู่ในรูปที่ปราศจากโมเลกุลของน้ำ (anhydrous phase) อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างให้กลายเป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตชนิดอื่น ๆได้อีกด้วย สำหรับงานวิจัยนี้จะให้ความสนใจไปยังสารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรท (MCPM) และไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรท (DCPD) เนื่องจากเป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่มีความสามารถในการละลายน้ำ และละลายในกรดได้ดี และสามารถแตกตัวเป็นไอออนปลดปล่อยสารที่เป็นองค์ประกอบของธาตุอาหารให้พืชใช้เป็นประโยชน์ได้

2.1.1 สารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟต

สารประกอบโมโนแคลเซียมฟอสเฟต (monocalcium phosphate monohydrate; MCPM) มีสูตรเคมีว่า $Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$ ชื่อเรียกตาม international union of pure and applied chemistry (IUPAC) ว่า แคลเซียมไดไฮโดรเจนออโธฟอสเฟต (calcium dihydrogen orthophosphate monohydrate) โดยทั่วไปรู้จักกันในชื่อปูนซุปเปอร์ฟอสเฟต (superphosphate of lime) ซึ่งมีความสามารถในการละลายในน้ำที่เป็นกรด (Dorozhkin, 2016) ผลึกของ MCPM เมื่อละลายน้ำแตกตัวให้ Ca^{+2} และ $H_2PO_4^-$ มีอัตราส่วนของ Ca/P ประมาณ 0.5 ในสารละลายที่มี pH ต่ำกว่า 2 แต่ MCPM ตกตะกอนในสารละลายอินทรีย์ (Boonchom, 2009) เมื่ออุณหภูมิในสารละลายมากกว่า 100 ^{o}C MCPM ปล่อยโมเลกุลน้ำ (H_2O) ออก และเปลี่ยนรูปไปเป็น monocalcium phosphate anhydrous ($Ca(H_2PO_4)_2$; MCPA) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในสารละลายมากกว่า 500 ^{o}C เปลี่ยนรูปเป็น $Ca(PO_3)_2$ (Tynsuaadu, 1990) MCPM ใช้เป็นสารอาหารสำหรับพืช สารเพิ่มความชุ่มชื้นในอาหาร อาหารเสริมสำหรับมนุษย์และสัตว์เลี้ยง รวมทั้งเครื่องดื่ม (Stein et al., 2008) ยังมีการใช้ร่วมระหว่าง MCPM กับ $NaHCO_3$ เพื่อเป็นสารที่ทำให้ฟูขึ้น (leavening agent) เช่น ผงฟู (baking powder) และ แป้งเบเกอรี่ (bakery dough) (Dorozhkin, 2013)

2.1.2 สารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟต

สารประกอบไดแคลเซียมฟอสเฟต (dicalcium phosphate dihydrate; DCPD) มีสูตรเคมีว่า $CaHPO_4.2H_2O$ ชื่อเรียกตาม IUPAC ว่าแคลเซียมไดไฮโดรเจนออโธฟอสเฟต (calcium hydrogen orthophosphate dihydrate) หรือแร่บรูไซต์ (mineral brushite) DCPD เป็นผลึกได้ง่ายจากสารละลายที่มี Ca^{+2} และ $H_2PO_4^-$ อัตราส่วนของ Ca/P ประมาณ 1.0 ในสารละลายที่มี pH อยู่ระหว่าง 2 ถึง 6.5 (Hamai, 2013) DCPD เปลี่ยนรูปเป็น dicalcium phosphate dihydrate anhydrous ($CaHPO_4$; DCPA) ที่อุณหภูมิประมาณ 80 ^{o}C ซึ่งการเปลี่ยนรูปทำให้ปริมาตรลดลง 11 % การเปลี่ยนรูปจาก DCPD เป็น DCPA ใช้พลังงาน -1.032 kJ/mol (Landin et al, 1994) DCPD ใช้การผลิตยาสีฟันที่จับฟลูออไรด์เป็น Na_2PO_4F

ยังนำ DCPD ไปประยุกต์ใช้ด้านอื่น ๆ เช่น ปุ๋ยละลายช้า อุตสาหกรรมการผลิตแก้ว และอุตสาหกรรมอาหาร (Dorozhkin, 2011)

2.1.3 สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต

สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟต (tricalcium diorthophosphate; TCP) มีสูตรเคมีว่า $Ca_3(PO_4)_2$ โครงสร้างของ TCP พบในรูปผลึกได้ 2 รูปแบบหลัก คือ β-TCP และ α-TCP เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -tricalcium phosphate ; β -$Ca_3(PO_4)_2$) และแอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (α -Tricalcium phosphate; α - $Ca_3(PO_4)_2$) มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 310.18 g/mol มีความหนาแน่นอยู่ที่ 3.14 g/cm^3 จัดเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น มีความเสถียรเมื่อสัมผัสกับอากาศ และมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก โครงสร้างของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟตอยู่ในรูปของ rhombohedral ด้วย space group R3cH ลักษณะเฉพาะของการจัดเรียงตัวตามระดับแนวแกน c ในแนวดิ่งถึงระนาบแกน a และ b เสมอเป็นแนวเดียวกัน โดยที่ทั้ง 2 ระนาบ (α-β) ทำมุม 90 องศา เท่ากัน ขณะที่ระนาบแกน a และ b ทำมุมกัน 120 องศา และมีขนาดของหน่วยเซลล์ a = b = 10.439 Å, c = 37.375 Å (ตารางที่ 2.2) โครงสร้างของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟตมีผลึก non-equivalent ของ PO_4^{3-} อยู่สามตำแหน่งกระจายอยู่ทั่วผลึก โดยมีความยาวพันธะและการทำมุมแตกต่างกันออกไป เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟตมีคุณสมบัติของการแลกเปลี่ยนไอออน (electrical charge) การเหนี่ยวนำไอออน (ion conduction) และการจัดเก็บประจุได้ดี (charge storage) เนื่องจาก 1) ความเสถียรของโครงสร้าง (Wang et al., 2010) 2) ภายในหนึ่งยูนิตเซลล์ของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟตนั้นประกอบไปด้วยอะตอมที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้มากถึง 273 อะตอม (Yin and Stott, 2003) ประกอบกับภายในโครงสร้างผลึกมีช่องว่างจำนวนมาก (Liang et al., 2010) นอกจากนี้ยังพบว่ามีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำกว่าแอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต ด้วยเหตุดังกล่าวเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟตจึงได้รับความสนใจในการนำมาศึกษาเป็นวัสดุดูดซับทางด้านสิ่งแวดล้อม

โครงสร้างของแอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต อยู่ในรูปของ monoclinic ด้วย space group P21/a มีลักษณะเฉพาะของการจัดเรียงตัวตามระดับแนวแกน c ในแนวดิ่งถึงระนาบแกน a (α) ทำมุมกัน 126.20° และมีขนาดของหน่วยเซลล์ a = 12.887 Å, b = 27.280 Å , c = 15.219 Å (ตารางที่ 2.2) โดยปกติแล้วจะเตรียมได้จาก β-TCP โดยให้ความร้อนแก่ β-TCP สูงถึงประมาณ 1,125 °C นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่แอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟตระหว่าง 1,125-1,430 °C จะทำให้ α-TCP เปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นซุปเปอร์แอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (α'-$Ca_3(PO_4)_2$) และจะกลายเป็นเฟสที่เสถียรเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 1,430 °C (Yashima et al., 2003)

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของไตรแคลเซียมฟอสเฟต

Compound	Space group	Unit cell parameters	Density, g cm^{-3}
α-Tricalcium phosphate (α-TCP)	Monoclinic $P2_1$/a	a = 12.887 Å, b = 27.280 Å , c = 15.219 Å ; α = 126.20°	2.86
β-Tricalcium phosphate (β-TCP)	Rhombohedral *R*3cH	a = b = 10.439 Å, c = 37.375 Å ; α = β = 90°, γ = 120°	3.07

ที่มา: Dorozhkin (2011)

2.2 การสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

2.2.1 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟต

การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตทำได้หลายวิธี แบ่งออกเป็น 3 วิธีการหลัก ๆ ได้แก่ การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตด้วยปฏิกิริยาของแข็ง (solid state reaction) การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตด้วยวิธีแบบเปียก (wet method) และวิธีไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal method) (Hsu, 2002 ; Mirhadi et al., 2011 ; Laranfeira, 2000) มีรายละเอียด คือ

2.2.1.1 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตด้วยปฏิกิริยาของแข็ง (solid state reaction)

การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตด้วยปฏิกิริยาของแข็ง (solid state reaction) ทำได้โดยการนำสารเคมีในสภาวะที่เป็นของแข็งมาทำปฏิกิริยากันที่อุณหภูมิสูง

2.2.1.2 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตด้วยวิธีแบบเปียก (wet method)

วิธีการสังเคราะห์แบบเปียก ทำได้ด้วยวิธีการตกตะกอนสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตโดยใช้สารละลายต่าง ๆ หรือน้ำเป็นตัวกลาง และทำการกำจัดโมเลกุลของน้ำหรือความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถเตรียมได้ในสภาวะที่อุณหภูมิไม่ต้องสูงมากนัก หรือสามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้อง

2.2.1.3 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (hydrothermal method)

วิธีการสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ทำได้โดยการนำสารเคมีที่เป็นเกลือของแคลเซียมและฟอสเฟตมาทำปฏิกิริยากันภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง

2.2.2 การสังเคราะห์โมโนแคลเซียมฟอสเฟต

Boonchom (2009) ได้สังเคราะห์โมโนแคลเซียมฟอสเฟตอย่างง่ายและรวดเร็วด้วยวิธีแบบเปียก โดยใช้ $CaCO_3$ และ H_3PO_4 ในน้ำร่วมกับอะซีโตนที่อุณหภูมิห้อง นาน 15 min และใช้การแปรสภาพ $Ca(H_2PO_4)_2{\cdot}H_2O$ โดยความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C ได้สารประกอบแคลเซียมโพลีฟอสเฟต (CaP_2O_6) ต่อจากนั้นดึงน้ำออกและปฏิกิริยาควบแน่นฟอสเฟต (phosphate condensation reactions) ด้วยเทคนิค thermoanalytical (TG/DTG/DTA) จึงสังเคราะห์สาร $Ca(H_2PO_4)_2{\cdot}H_2O$ Sánchez-Enríquez and Reyes-Gasga (2013) ได้สังเคราะห์โมโนแคลเซียมฟอสเฟต โดยใช้ไดแคลเซียมฟอสเฟต (brushite) เป็นสารตั้งต้น ซึ่งได้มาจากกระบวน sonification ของการตกตะกอนของ calcium chloride bihydrated ($CaCl_2{\cdot}2H_2O$), monobasic sodium phosphate ($Na_2HPO_4{\cdot}2H_2O$) ที่ 90 kHz 500 วัตต์ นาน 60 min และตามด้วยกระบวน lyophilization 3 ครั้ง นาน 240 min

2.2.3 การสังเคราะห์ไดแคลเซียมฟอสเฟต

Sánchez-Enríquez and Reyes-Gasga (2013) ได้สังเคราะห์ไดแคลเซียมฟอสเฟต (Brushite) โดยใช้การตกตะกอน calcium chloride bihydrated ($CaCl_2{\cdot}2H_2O$) และ monobasic sodium phosphate ($Na_2HPO_4.2H_2O$) เป็นสารตั้งต้น ภาวะแห้งในสุญญากาศ ด้วยกระบวน sonification ที่ 90 kHz 500 วัตต์ นาน 90 min

2.2.4 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟต

การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตทำได้จากหลายวิธี เช่น Hsu (2002) ได้การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ solid state reaction พบว่าเฟสผสมกันระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HA) และ เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β-TCP) สามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรท $Ca(H_2PO_4)_2{\cdot}H_2O$ กับ $CaCO_3$ โดยนำ $Ca(H_2PO_4)_2{\cdot}H_2O)$ กับ $CaCO_3$ ไปผสมกับเอทานอลบริสุทธิ์ ปริมาตร 250 ml เป็นเวลา 24 h แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เมื่อนำไปตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเทคนิค TG/DTA/DSC และศึกษากลไกในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆพบว่า ที่อุณหภูมิระหว่าง 44-153 °C เกิดการสลายตัวของน้ำภายในโมเลกุลของ $Ca(H_2PO_4)_2{\cdot}H_2O$ ที่อุณหภูมิ 710-815 °C เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต $CaCO_3$ เป็น CaO และพบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 °C จะได้เฟสผสมระหว่างระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HA) และ เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β-TCP) ขณะที่อุณหภูมิ 900-1,000 °C จะได้ผลิตภัณฑ์ของไตรแคลเซียมฟอสเฟต (TCP) Mirhadi et al. (2011) ทำการสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมฟอสเฟตในระดับอนุภาคนาโนด้วยวิธีการตกตะกอนแบบเปียก (wet precipitation) จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายแคลเซียมไนเต

รทเตตระไฮเดรท ($Ca(NO_3)_2{\cdot}4H_2O$) กับสารละลายไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($(NH_4)_2HPO_4$) พร้อมทั้งศึกษาผลของ pH ที่มีผลต่อเฟสผสมของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต และในขั้นตอนสุดท้ายคือการนำตะกอนที่ได้ไปเผาแบบ calcined ที่อุณหภูมิ 700 °C ตัวอย่างที่ได้จากขั้นตอนสุดท้ายนี้นำไปศึกษาลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค XRD, FTIR, ICP-AES และ ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อเตรียมสารละลายแคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรทให้มีค่า pH 8 ผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดเป็นเฟสผสมกันระหว่าง β-$Ca_3(PO_4)_2$ กับ $Ca_5(PO_4)_3(OH)$ ในขณะที่เมื่อเตรียมสารละลายแคลเซียมไนเตรทเตตระไฮเดรทให้มีค่า pH 10.8 พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ β-$Ca_3(PO_4)_2$ และ การศึกษาของ Laranjeira (2000) ที่ได้สังเคราะห์เฟสผสมของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตเปรียบเทียบระหว่างสองวิธีการคือ วิธีการที่ 1 การทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย $(NH_4)_2HPO_4$ ในน้ำกลั่นกับ $CaCO_3$ และวิธีการที่ 2 การทำปฏิกิริยาระหว่าง $(NH_4)_2HPO_4$ ในสารละลาย NH_4F เข้มข้น 20 ppm แล้วนำสารละลายที่ได้ไปทำปฏิกิริยากับ $CaCO_3$ ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองถูกควบคุมความเป็นกรดด่างให้อยู่ระหว่าง 8.5-9.0 ด้วย NH_4OH จากนั้นบรรจุเข้าไปใน pressure vessel ปิดฝาให้สนิทแล้วนำเข้าเผาที่มีอุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดตัวอย่างจะถูกล้างและไล่ความชื้นด้วยการอบที่อุณหภูมิ 80 °C นาน 30 h จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ไปตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ พบว่า เมื่อใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไตรแคลเซียมฟอสเฟต ขณะที่เมื่อใช้ NH_4F เป็นตัวทำละลายผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไฮดรอกซิอะพาไทป์

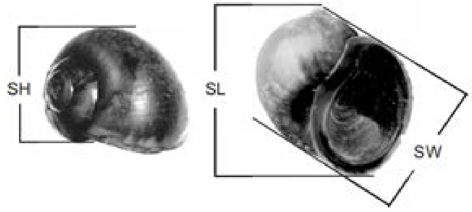
2.3 วัสดุปูนจากเปลือกของสัตว์น้ำ

การใช้ประโยชน์จากเปลือกหอยซึ่งถือว่าเป็นวัสดุปูนธรรมชาติ ที่เหลือทิ้งกลายเป็นขยะสะสมจำนวนมากทั้งจากเปลือกหอยทะเล เช่น หอยนางรม หอยแมลงภู่ เปลือกหอยน้ำจืด เช่น หอยเชอรี่ เป็นต้น ซึ่งทั้งหมดจะใช้ประโยชน์เฉพาะเนื้อ ส่วนเปลือกจะถูกทิ้งก่อให้เกิดปัญหาขยะ และสุขอนามัย (สามารถ และคณะ, 2561) ในหลายประเทศ เช่น เกาหลีใต้ Lee et al. (2008) ได้ใช้เปลือกหอยนางรมเผาเป็นวัสดุปูนทางเลือกเพื่อปรับปรุงสมบัติทางเคมีและชีวภาพของดินดอนและเพิ่มผลผลิตพืชของดิน (crop productivity) การใช้แคลเซียมที่มาจากเปลือกของสัตว์จัดเป็นวัสดุชีวภาพที่มีคุณสมบัติและโครงสร้างเหมาะสมต่อการใช้ในสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ Pal et al. (2019) ได้สังเคราะห์ไฮดรอกซีแอพาไทต์เจือกับสตรอนเทียม (Sr) จากเปลือกหอยตลับ (mercenaria clam) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ด้วยการใช้ ความเข้มข้นของ Sr ทดแทน Ca ในไฮดรอกซีแอพาไทต์ที่ระดับ 10, 30, 50 และ 70% ของ Ca และพบว่าเมื่อเพิ่ม Sr ไปมากกว่า 50 % ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้น และไม่เป็นพิษกับเซลล์สัตว์ Kang et al. (2017) สังเคราะห์เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β-TCP, $Ca_3(PO_4)_2$) จากเปลือกหอยเป๋าฮื้อ โดยใช้แคลเซียม

ออกไซด์ (CaO) จากเปลือกหอยมาเผา เติมน้ำได้เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) สำหรับการสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) จะเติมคาร์บอนไดออกไซด์ไปรวมกับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ pH 7.4 แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้นำมาทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกที่ pH 6.0 จะได้ไดแคลเซียมฟอสเฟต ($CaHPO_4$) จากนั้นสังเคราะห์เบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟตโดยการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่าง $CaHPO_4$ กับ CaO ที่ 950 °C ถึง 1100 °C เป็นเวลา 3 h และทดสอบความปลอดภัยเมื่อใช้กับสิ่งมีชีวิตพบว่าเหมาะสมที่จะใช้เป็นกระดูกเทียมได้ ไม่เพียงแต่การใช้เพื่อผลิตเป็นวัสดุในทางการแพทย์ Dahlan et al. (2019) ได้ใช้เปลือกของปูทะเล (*Scylla serrata*) เป็นวัสดุธรรมชาติเพื่อทำเป็นไบโอเซรามิก ด้วยวิธีการเผาที่ 800°C - 1000°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จะได้ไฮดรอกซีแอพาไทต์ที่ไม่มีคาร์บอนเจือปน แต่ถ้าให้สัมผัสกับอากาศตัวอย่างอาจรวมกับน้ำแล้วเปลี่ยนเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ นุชนภา และคณะ (2557) ผลิตโมโนแคลเซียมฟอสเฟตสำหรับใช้เป็นปุ๋ยจากเปลือกหอยแมลงภู่ด้วยการทำปฏิกิริยาตกตะกอนกับกรดฟอสฟอริกในตัวกลางอะซิโตน จะได้ผลผลิตเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต และโมโนแคลเซียมฟอสเฟต วรุณทิพย์ (2560) สังเคราะห์โมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($Ca(H_2PO_4)_2{\cdot}H_2O$, MCPM) จากเปลือกหอยทรายบดและกรดฟอสฟอริก เช่นเดียวกับ Onoda and Yamazaki (2016) สังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยทราย (corbicula shells) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล DePaula et al. (2010) เปลี่ยนเปลือกหอยโข่ง (*Pomacea lineate*) เป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยให้ทำปฏิกิริยากับสารละลายฟอสเฟตที่อุณหภูมิห้อง งานวิจัยของ Onoda and Nakanishi (2012) ที่สังเคราะห์ calcium phosphate จากเปลือกหอยนางรม พบว่าที่ความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริค 0.1 และ0.05 mol/l ได้ค่าการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ที่เป็นปริมาณของ calcium hydrogen phosphate มากกว่าที่ความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริค 0.01 mol/l ที่จะทำให้เกิดเป็น calcium carbonate งานวิจัย Tămăşan et al. (2013) ได้ผลิตแคลเซียมฟอสเฟตที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของกรดฟอสฟอริกกับเปลือกของเม่นทะเลทำให้ได้ผลผลิตที่เกิดขึ้นอยู่ในรูป brushite และ calcite และผลผลิตที่ได้จากการผลิตกับเปลือกหอยนมสาวจะอยู่ในรูป monetite จะเห็นได้ว่าเปลือกของสัตว์ที่นำมาผลิตต่างกันจะได้ผลผลิตที่เป็นชนิดของแคลเซียมฟอสเฟตต่างกันด้วย จากงานวิจัยของ Boonchom and Danvirutai (2009) สามารถแปรรูปเปลือกหอยมาเป็นปุ๋ยทริปเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต ที่ใช้เป็นแม่ปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยจากการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่ามีปริมาณฟอสฟอรัสในรูป P_2O_5 อยู่ประมาณ 64% ซึ่งมากกว่าปุ๋ยที่ได้จากการผลิตด้วยหินฟอสเฟต และยังได้มีการพัฒนาการแปรรูปเปลือกหอยมาเป็นแม่ปุ๋ยไนโตรเจน คือ แคลเซียมไนเตรต ที่มีไนโตรเจนอยู่ประมาณ 15% จะเห็นได้ว่าจากวัสดุเริ่มต้นที่เป็นของเหลือใช้ที่เป็นเปลือกหอยสามารถนำมาผลิตปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารหลักฟอสฟอรัส และไนโตรเจนได้

2.4 วัสดุปูนจากเปลือกหอยเชอรี่

หอยเชอรี่ (*Pomacea caniculata* (Lamarck,1822)) เป็นสัตว์พื้นเมืองจากอเมริกาใต้ (ภาพที่ 2.1) และแพร่กระจายไปทั่วเอเชีย จัดเป็นหอยที่มีผลกระทบต่อระบบนิเวศของพื้นที่ชุ่มน้ำมาก (Carlsson et al., 2004) ในอดีตมีปัญหากับเกษตรกรเพราะกัดกินต้นข้าว (Joshi and Sebastian, 2006) แต่ปัจจุบันสามารถนำเนื้อมาบริโภคเป็นอาหารได้หลากหลาย เช่น ลาบหอยเชอรี่ ส้มตำป่า ดังนั้นจึงมีส่วนเปลือกเหลือทิ้งเป็นขยะทางชีวภาพ (Oladoja et al., 2013) ได้ประเมินความสามารถของการใช้เปลือกหอยทากแอฟริกันเพื่อเป็นแหล่งของแคลเซียมอิออนในการกำจัดฟอสเฟต ให้อยู่ในรูปผลึกแร่แคลเซียมฟอสเฟต ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้เปลือกหอย 2 กรัม ใส่ในน้ำที่มีฟอสเฟตความเข้มข้น 25- 1,000 mg/L จะสามารถกำจัดฟอสเฟตได้มากกว่า 99 % และนักวิจัยได้แนะนำว่าควรนำไปใช้เพื่อการปรับปรุงดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินกรด หรือนำไปใช้เป็นปุ๋ยต่อได้ เพราะมี $CaCO_3$ สูง ดังตารางที่ 2.3



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของเปลือกหอยเชอรี่และวิธีการวัดขนาด ความสูงของเปลือก (SH) ความยาวของเปลือก (SL) และความกว้างของเปลือก (SW)
ที่มา: Teo (2004)

ตารางที่ 2.3 ปริมาณร้อยละ $CaCO_3$ ในเปลือกหอยเชอรี่

ปริมาณร้อยละ $CaCO_3$	เทคนิควิเคราะห์	อ้างอิง
88.25	วิธีการอาบนิวตรอน (NAA)	ศศิพันธุ์และคณะ (2539)
99.302	การวาวรังสีเอกซ์ (XRF)	นิชธิมา และคณะ (2553)

การใช้โยชน์จากเปลือกของหอยเชอรี่

หอยเชอรี่เป็นปัญหาสำหรับเกษตรกรผู้ปลูกข้าว เพราะหอยจะกัดกินต้นข้าวให้เสียหาย จึงมีความต้องการลดปริมาณของหอยชนิดนี้ลง ซึ่งปัจจุบันการนำหอยเชอรี่มาประกอบอาหารได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น นักวิจัยจึงได้ศึกษาเพื่อใช้ประโยชน์จากส่วนเปลือกที่เหลือทิ้ง เช่นใช้เปลือกหอยเชอรี่บดเพื่อช่วยในการปรับสภาพดินกรด และพบว่าการใส่เปลือกหอยเชอรี่จะช่วยเพิ่ม pH ในดินได้ 2-3 ระดับ (Farrah et al., 2017) หรือเตรียมวัสดุชีวภาพแหล่งแคลเซียมจากเปลือกหอยเชอรี่ โดยการเผาที่

อุณหภูมิ 600 °C, 700 °C, 800 °C และ 900 °C เป็นเวลา 1 h และ 3 h ในอัตราความร้อน 5 °C/min ผลพบว่าได้ผงละเอียดสีขาวของแคลไซท์ ($CaCO_3$) และจะเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 800°C (Leelatawonchai and Laonapakul, 2014) งานวิจัยของ Putro et al. (2014) สังเคราะห์ไฮดรอกซีแอพาไทต์ที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้อัลตราซาวด์ร่วมกับไมโครเวฟจากเปลือกหอยเชอรี่ (*Pomacea* sp.) ด้วยวิธีการเติมกรดซิตริกร่วมกับ Na_2HPO_4 จะได้วัสดุที่สามารถใช้ทางการแพทย์ได้ จากงานวิจัยของปวัลญาพร และคณะ (2557) ใช้เปลือกหอยเชอรี่มาสังเคราะห์เป็นไตรแคลเซียมฟอสเฟต เพื่อเพิ่มมูลค่า และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ ได้

2.5. ความสำคัญของธาตุฟอสฟอรัสในการเกษตร

ธาตุฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและสืบพันธุ์ (reproduction) ของพืช เช่นเดียวกันกับธาตุไนโตรเจน และโพแทสเซียม ในอ้อยบทบาทหลักของธาตุฟอสฟอรัสในการถ่ายทอดพลังงาน นำพา ADP และATP และบทบาทในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์แสงและเมตาโบลิซึมของอ้อย เป็นองค์ประกอบของกรดนิวคลิอิคแอซิค ซึ่งมีความสำคัญมากต่อการแบ่งเซลล์ โดยเฉพาะระบบรากที่สมบูรณ์ (healthy root system) การแตกกอและการเจริญเติบโตของยอดอ่อน ธาตุฟอสฟอรัสที่อยู่ในสารอินทรีย์และอนินทรีย์ซึ่งส่วนใหญ่ดูดซึมทางรากในรูปของไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน $(H_2PO_4)^-$ เมื่อความเป็นกรด-ด่างในดินต่ำกว่า 7.2, และไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน $(HPO_4)^{2-}$ เมื่อความเป็นกรด-ด่างในดินสูงกว่า 7.2. จากรายงานของ Fageria and Baligar (2001) กล่าวไว้ว่าธาตุฟอสฟอรัสส่งเสริมการเพิ่มผลผลิตในพืชในพื้นที่ดินกรด และรวมทั้งอ้อย (Meyer and Wood, 1989) ถ้าอ้อยปลูกในพื้นที่เป็นดินสีแดง (red oxisol soils) ทำให้มีความเสี่ยงต่อการขาดฟอสฟอรัสของอ้อยในเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน (tropical and subtropical)

ฟอสฟอรัส (P) เป็นองค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับพืช (Stevenson and Cole, 1999) แต่มักจะเป็นธาตุอาหารพืชที่มีอยู่ในดินอย่างจำกัด ไม่เคลื่อนที่ในดิน และส่งผลต่อผลผลิตพืชเพราะพืชไม่สามารถใช้ประโยชน์จากที่มีอยู่ในดินได้เพียงพอ อันเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลาย ๆ อย่างพร้อมกันอย่างรวดเร็ว เช่น การละลาย การตกตะกอน การดูดซับ และการออกซิเดชัน-รีดักชั่นของฟอสฟอรัสในดิน (Bolan et al., 1986) นอกจากนี้ Bolan et al. (1994) พบว่าการรวมกันของสารอินทรีย์และปุ๋ยฟอสฟอรัสในดินจะช่วยลดการละลายของฟอสเฟต ทำให้การคงอยู่ของฟอสฟอรัสในดินได้นานกว่าการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสโดยโดยไม่ใส่สารอินทรีย์ อาจมีเหตุผลมาจากสารอินทรีย์และ ฟอสฟอรัสทำหน้าที่ต้านกันในการดูดซับของดิน (Hue, 1991) และ (Hu et al., 2001) ได้รายงานว่าผลของสารอินทรีย์ต่อการดูดซับฟอสเฟตสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรดด่างของดิน ดังนั้นการเพิ่มความสามารถในการละลายได้ของ

ฟอสฟอรัสจะช่วยให้พืชสามารถนำสารอาหารไปใช้ประโยชน์ได้ (Giovannini et al., 2013) ได้ใช้ complex super-phosphates โดยเป็นสารผสมระหว่างกรดฮิวมิกกับแคลเซียมโมโนฟอสเฟตเติมลงในดินด่าง ทำให้ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้นานกว่าปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต (Nasri et al., 2015) ได้ทดลองใช้ monocalcium phosphate monohydrate ที่สังเคราะห์จาก triple superphosphate ทำให้เพิ่มความสามารถในการละลายได้มากขึ้น ค่าความสามารถในการละลายเท่ากับ 783.1 g/l

2.6 การผลิตปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟต

อุตสาหกรรมหลักที่มีการใช้ผลิตภัณฑ์จากแคลเซียมฟอสเฟต คือ การใช้เป็นปุ๋ยทางการเกษตร สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตธรรมชาติที่ถูกนำมาทำปุ๋ย อาจจะได้มาจากองค์ประกอบของหินและแร่ หรือจากองค์ประกอบทางชีวภัณฑ์ เช่น หินฟอสเฟต (phosphate rock) เป็นหินซึ่งมีแร่อะพาไทต์ (apatite) เป็นองค์ประกอบ และ quano ที่เกิดจากการสะสมของมูลนกทะเลนับพันปี (Dorozhkin and Epple, 2002) เนื่องจากสินแร่เหล่านี้มีปริมาณฟอสฟอรัสมากพอที่จะใช้เป็นปุ๋ยโดยตรง หรือ นำมาเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตปุ๋ยฟอสเฟตรูปอื่น (ยงยุทธ และคณะ, 2553) การผลิตปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟตที่มีธาตุฟอสฟอรัสอยู่ในรูปสารประกอบฟอสเฟต ที่ใช้เป็นปุ๋ยทางการเกษตร คือ ซูเปอร์ฟอสเฟตธรรมดา ดับเบิลซูเปอร์ฟอสเฟต และ ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต

2.6.1 ซูเปอร์ฟอสเฟตธรรมดา (ordinary superphosphate)

การผลิตปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟตธรรมดา เป็นการเปลี่ยนสภาพของหินฟอสเฟตให้ปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาให้เป็นประโยชน์กับพืชมากขึ้น โดยการนำหินฟอสเฟตมาทำปฏิกิริยากับกรดอนินทรีย์ เพื่อเปลี่ยนรูปของไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_3(PO_4)_2$) ที่เป็นองค์ประกอบที่ไม่ละลายน้ำให้เป็นไดแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca(HPO_4)$) และโมโนแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca(H_2PO_4)_2$) ตามลำดับ ซึ่งสัดส่วนและปริมาณขององค์ประกอบทั้งสองจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของหินฟอสเฟต และกรดที่ใช้ โดยกรดอนินทรีย์ที่นิยมใช้คือ กรดกำมะถัน หลักการผลิตปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟตธรรมดาเป็นการผสมระหว่างกรดกำมะถันกับหินฟอสเฟตที่บดละเอียด (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) อัตราส่วนของกรดกำมะถันเข้มข้น 70% จำนวน 60 g/หินฟอสเฟต 100 g ทำให้ได้ผลผลิตของ water soluble/total P_2O_5 ดีกว่าความเข้มข้นอื่น โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reaction) นอกจากจะได้ปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟตแล้ว ยังได้สารประกอบแคลเซียมซัลเฟตที่ทำหน้าที่เป็นตัวทำให้ปุ๋ยแห้งเร็วด้วย ปุ๋ยที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จะมีปริมาณ P_2O_5 20 % มีส่วนของ water soluble และ available P_2O_5 เท่ากับ 88.4 และ 95.8 % ตามลำดับ (Nunn and Dee, 1954)

2.6.2 ดับเบิลซูเปอร์ฟอสเฟต (double superphosphate)

ผลิตได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างหินฟอสเฟตกับกรดกำมะถันและกรดฟอสฟอริก โดยมีการทำปฏิกิริยาสองครั้ง ครั้งที่หนึ่ง เป็นการสร้างกรดฟอสฟอริกโดยใช้หินฟอสเฟตทำปฏิกิริยาแบบเปียก (wet process) กับกรดกำมะถันได้กรดฟอสฟอริกที่คุณภาพไม่สูง ดังปฏิกิริยา 2.1 (Pacheco-Torgal et al., 2012) และครั้งที่สอง นำกรดฟอสฟอริกมาทำปฏิกิริยากับหินฟอสเฟต ได้ปุ๋ยฟอสเฟตที่มีฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ 40 %องค์ประกอบหลักเป็นโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ($Ca(H_2PO_4)_2).H_2O$ 30 % ไดแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca(HPO_4)$) 10 % และ 45 % เป็นยิปซัม (Paz et al., 2008)

$$[Ca_3(PO_4)]_3CaF_2 + 10H_2SO_4 + 20H_2O \xrightarrow{75\text{-}80\,^{\circ}C} 10CaSO_4.nH_2 + 6H_3PO_4 + 2HF \qquad (2.1)$$

2.6.3 ทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (triple superphosphate)

ผลิตได้จากปฏิกิริยาระหว่างหินฟอสเฟตบดที่มีฟอสเฟตสูงกว่า 30 % P_2O_5 กับกรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นสูง (52 % P_2O_5) ได้ผลผลิตที่เป็นโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรตที่ตกผลึกทันทีหลังการผสมกันเป็นหลัก ปุ๋ยที่ผลิตได้จะมีการบ่ม (curing) เป็นเวลา 3-6 สัปดาห์ เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดสมบูรณ์ ตามสมการ 2.2โดยมีฟอสเฟตที่มีฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ 46 % (ยงยุทธ และคณะ, 2553)

$$Ca_{10}(PO_4)_6F_2 + 14H_2PO_4 + 10H_2O \longrightarrow 10\ Ca(H_2PO_{4)2}).H_2O + 2HF \qquad (2.2)$$

2.7. การใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอ้อย

การใช้ฟอสฟอรัสในรูปของปุ๋ยเคมีที่ละลายน้ำได้ง่าย มีปัญหาในด้านการเกิดปฏิกิริยาให้ตกตะกอนและถูกตรึงกับสารประกอบพวกเหล็กอะลูมินัม และแร่ดินเหนียวมาก ทำให้ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์กับพืช ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปของหินฟอสเฟต (PR) ซึ่งมีราคาถูกกว่าในรูปของปุ๋ยเคมี จะช่วยลดการตรึงของฟอสฟอรัสในดิน โดยการปลดปล่อยออกมาอย่างช้าๆ ในดินโดยทั่วไปมักพบว่าการละลายของฟอสฟอรัส จากหินฟอสเฟตมักจะช้าเกินไป ไม่เพียงพอและทันต่อความต้องการของพืชเศรษฐกิจที่มีอายุสั้น อย่างไรก็ตามใน สภาพดินกรดบริเวณพื้นที่ดอนในเขตร้อนชื้นประสิทธิภาพของหินฟอสเฟต (agronomic effectiveness) อาจจะใกล้เคียง กับปุ๋ยเคมีที่ละลายน้ำได้ง่าย (Hammond et al., 1986) นอกจากนี้การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปหินฟอสเฟตในดินยังมีส่วนช่วยเพิ่ม pH ของดิน และลดความเป็นพิษของอลูมินัม (Chien and Hammond, 1978) พบว่าการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปหินฟอสเฟตละลายน้ำได้ยากและปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ได้น้อยและช้า และเพื่อผลิต

ปุ๋ยฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ง่ายและใช้ได้ดีกับดินทุกสภาพความเป็นกรดด่างของดิน จึงได้มีการนำเอาโมโนแคลเซียมฟอสเฟตมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์หรือละลายน้ำได้ 16-20 % มาใช้

การให้ปุ๋ยแก่อ้อยจะตอบสนองต่อปริมาณธาตุไนโตรเจนเมื่อดินมีความชื้นที่เพียงพอ ซึ่งจะขึ้นกับการกระจายของฝนที่ตกในพื้นที่ หากปลูกอ้อยนอกเขตชลประทานหรือไม่มีระบบการให้น้ำ ซึ่งเมื่อเทียบการตอบสนองต่อการใช้ปุ๋ยเรียงตามลำดับคือ ใช้ปุ๋ยไนโตรเจนสูงสุด รองลงมาเป็นโพแทสเซียม และฟอสฟอรัส ตามลำดับ ทักษิณาและคณะ (2548) จากการสำรวจสมบัติของดินที่ปลูกอ้อยเป็นเวลานานจะพบปริมาณของฟอสฟอรัสสูง หากเกษตรกรใส่ปุ๋ยสูตรเสมอ เช่น 15-15-15 ติดต่อกันหลายปี เช่นเดียวกับ Mardamootoo et al. (2013) ที่พบว่าการให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราสูงติดต่อกันแก่อ้อยที่ปลูกใน Mauritius เป็นระยะเวลา 60 ปี จะก่อให้เกิดข้อกังวลเกี่ยวกับการชะละลายฟอสฟอรัสโดยน้ำฝน ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น ยังมีแนวโน้มในการขาดธาตุอาหารรอง เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม และธาตุอาหารเสริม เช่น เหล็ก สังกะสี โบรอนและซิลิคอน (กอบเกียรติ, 2558) Pawar et al. (2003) ทำการศึกษาในดินเหนียว Haplustats ที่ Maharashtra ของอินเดียโดยใช้ปุ๋ยเคมีที่มีอัตรา 250, 115, และ 115 kg /ha ของ N, P_2O_5 และ K_2O ซึ่งเป็นอัตราปุ๋ยที่นิยมใช้เป็นชุดควบคุม (RD) เปรียบเทียบกับ RD ที่ไม่ใส่ฟอสฟอรัส, RD พร้อมกับพ่นทางใบด้วยฟอสฟอรัส 8, 12 kg/ha และชุดการทดลองที่เป็น RD พร้อมกับพ่นทางใบด้วยโบรอน (1%), RD พร้อมกับพ่นทางใบด้วยเหล็กและสังกะสี อย่างละ 0.5%, RD พร้อมกับพ่นทางใบด้วยซิลิกอน (2%) จากการวิเคราะห์ผลสองปีพบว่าเอนไซม์ sucrose synthase และ sucrose phosphate synthase ซึ่งเป็นเอ็นไซม์ที่สำคัญในการสะสมน้ำตาลของอ้อยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อฉีดพ่นปุ๋ยฟอสฟอรัสทางใบทั้ง 8, 12 kg ha^{-1} เทียบเท่ากับการให้จุลธาตุอาหาร และยังทำให้องค์ประกอบผลผลิตที่เป็นน้ำตาลเพิ่มสูงกว่าชุดควบคุมด้วย

Omollo and Abaya (2001) ได้ศึกษาการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ชนิด ได้แก่ single superphosphate (SSP), triple superphosphate (TSP), diammonium phosphate (DAP), และ rock phosphate (RP) ที่ 4 ระดับ คือ 0, 17, 34, และ 52 kg P/ ha ต่อผลผลิตและคุณภาพของอ้อยที่ปลูกในดิน Eutric Vertisol ที่ประเทศเคนย่า พบว่า ชนิดของปุ๋ยฟอสฟอรัสมีผลต่อปริมาณผลผลิตในอ้อยตอ 2 จากมากไปหาน้อย คือ DAP>RP>TSP>SSP แต่ไม่มีผลต่อคุณภาพของผลผลิตอ้อย และพบว่าระดับของฟอสฟอรัสที่เหมาะสมต่อการเพิ่มผลผลิตอ้อย คือ 34 kg P/ ha หรือ 80 kg P_2O_5 /ha งานวิจัยของ Goundar et al. (2014) ศึกษาถึงฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ในดินใช้ปลูกอ้อยอย่างยั่งยืนของประเทศฟิจิ เพื่อที่จะหาปริมาณความต้องการปุ๋ยอนินทรีย์ที่จะใช้กับดินปลูกอ้อยในดิน 20 ชนิดที่ต่างกัน เพื่อหาค่าดัชนีความต้านทานของฟอสฟอรัส (phosphorus buffer index, PBI) พบว่า ดินที่มีพัฒนาการมานานจะมีค่า PBI สูงกว่าดินที่เริ่ม

มีพัฒนาการ เช่น ดิน Oxisols มีค่าสูงกว่า ดิน Inceptisols และสิ่งที่น่าสนใจคือดินที่มีค่า PBI ต่ำจะมีความเสี่ยงที่จะเกิดศักยของการชะละลายฟอสฟอรัสออกไปจากดินด้วยน้ำบ่าไปกับน้ำล้นผิวดินได้สูง ปริมาณดินเหนียวที่มีอยู่ในดินจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า PBI และการตรึงฟอสฟอรัสมีความสัมพันธ์อย่างมากต่อเหล็กและอะลูมินัมที่มีอยู่ในดิน และงานของ Sunda et al., (2002) ศึกษาการเพิ่มการละลายของปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ให้แก่อ้อย โดยการใช้จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายฟอสเฟส (PSB) *Bacillus megatherium* var. *Phosphaticum* ที่ผลิตร่วมกับลิกไนต์ อัตรา 10 kg ha^{-1} ต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน และการเจริญเติบโตและผลผลิตอ้อย พบว่า การใช้ PSB ทำให้ผลผลิตอ้อยเพิ่มขึ้น 12.6% เมื่อเทียบกับไม่ได้ใช้ และสามารถลดปริมาณการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสลงได้ 25 % ถ้าใช้หินฟอสเฟตทดแทนปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟตก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายลดลง 50 % คุณภาพของน้ำอ้อยและผลผลิตน้ำตาลจะเพิ่มด้วยเมื่อใช้จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายฟอสเฟต

2.8 อุตสาหกรรมอ้อยของประเทศไทย

อ้อย (sugarcane) จัดอยู่ในวงศ์ (family) Gramineae สกุล (genus) *Saccharum* จำแนกได้เป็น 6 ชนิด (species) ปัจจุบันชนิดอ้อยที่ปลูกเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล คือ *S. officinarum* เป็นพืชเขตร้อนชื้น (tropical) มีแหล่งกำเนิดอยู่ในนิวกินี ตั้งอยู่ทางทิศเหนือของประเทศออสเตรเลีย และเป็นเกาะใหญ่ในมหาสมุทรแปซิฟิก (Hunsigi, 1983) มีลักษณะภายนอกประกอบด้วยลำต้นเป็นข้อและปล้องชัดเจน มีใบเกิดสลับข้างกัน และมีส่วนกาบใบหุ้มลำต้น กาบใบและใบจะมีไขและขนปกคลุมอยู่ รากอ้อยเป็นระบบรากฝอยแต่แข็งแรง และสามารถหยั่งลงไปในดินได้ลึกกว่า 4 เมตร และแผ่ขยายออกด้านข้างกว่า 3 เมตร (Smith et al., 2005) ลำต้นอ้อยสามารถแตกหน่อได้จากตาของข้อที่อยู่ชิดดินหรือใต้ดินได้ มีการขยายพันธุ์แบบใช้ต้นหรือท่อนพันธุ์ การเจริญเติบโตที่ดีควรมีปริมาณน้ำฝน 1,200 มิลลิเมตรต่อปี ขึ้นไป และมีการกระจายสม่ำเสมอในช่วงอ้อยอายุ 1-8 เดือน และแสงแดดเพียงพอ โดยทั่วไปอ้อยเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 20 องศาเซลเซียส และลดลงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส อ้อยโรงงานมีอายุการเก็บเกี่ยว 11-12 เดือน และก่อนเก็บเกี่ยว 2 เดือน ไม่ควรมีฝนตก และมีอุณหภูมิในช่วงกลางคืนค่อนข้างเย็น ปัจจัยเหล่านี้ จะช่วยให้อ้อยมีผลผลิตสูง และมีเปอร์เซ็นต์น้ำตาลสูงด้วย ในการปลูกอ้อยแต่ละครั้งสามารถไว้ตอเพื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตได้หลายปี ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่และการจัดการแปลงปลูก (เฉลิมพล, 2547) สภาพพื้นที่ที่ใช้ในการปลูกอ้อย ควรเป็นที่ดอนหรือที่ลุ่มที่ไม่มีน้ำท่วมขัง มีความลาดเอียงไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ และมีการคมนาคมสะดวก อยู่ห่างจากโรงงานน้ำตาลไม่เกิน 50 กิโลเมตร ดินที่ใช้ปลูกอ้อย ควรเป็นดินร่วน ดินร่วนปนทราย หรือดินร่วนเหนียว มีความอุดมสมบูรณ์ของดินปานกลาง มีอินทรียวัตถุไม่ต่ำกว่า 1.5 เปอร์เซ็นต์ ระดับหน้าดินลึกไม่น้อยกว่า 50 เซนติเมตร มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ระหว่าง 5.5-7.0 (ประสิทธิ, 2558)

พันธุ์อ้อยที่ปลูกในประเทศไทยมีหลากหลายพันธุ์ โดยข้อที่ควรพิจารณาในการเลือกพันธุ์ คือ ควรเลือกพันธุ์อ้อยที่เหมาะสมกับสภาพท้องถิ่น ให้ผลผลิตและมีคุณภาพความหวานสูง พันธุ์ที่ต้านทานต่อโรคหรือแมลงที่มีการระบาด พันธุ์ที่มีความสามารถในการไว้ตอได้ไม่น้อยกว่า 2 ครั้ง และมีผลผลิตลดลงจากอ้อยปลูกไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ เช่น ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือพื้นที่ปลูกอ้อยส่วนใหญ่อยู่นอกเขตชลประทาน สภาพดินเป็นดินเนื้อหยาบ ดังนั้นพันธุ์อ้อยที่เลือกจึงควรทนแล้งได้ดี เช่น พันธุ์เค 95-84 แอลเค 92-11 และแอลเค 92-14 ของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย พันธุ์อู่ทอง 4 สุพรรณบุรี 80 ขอนแก่น 3 และขอนแก่น 80 ของกรมวิชาการเกษตร (ประสิทธิ, 2558) โดยพันธุ์ที่นิยมปลูกมากคือพันธุ์ขอนแก่น 3 ถึงร้อยละ 64 ของทั้งประเทศ ส่วนในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ร้อยละ 82 เป็นพันธุ์ที่มีลักษณะเด่นคือ มีลักษณะทรงกอกว้าง กาบใบมีไขปานกลาง มีขนเล็กน้อย มีความงอกดี แตกกอดี ใบคลุมพื้นที่เร็ว ต้านทานต่อโรคแส้ดำ ทนทานต่อหนอนกอลายจุดใหญ่และหนอนกอลายจุดเล็ก เป็นพันธุ์ที่ฟื้นตัวหลังกระทบแล้งได้ดี จึงเหมาะสำหรับเขตที่มีการกระจายตัวของฝนไม่ดี ให้ผลผลิตสูงโดยอ้อยปลูกให้ผลผลิตมากถึง 23.0 ตัน/ไร่ และอ้อยตอให้ผลผลิต 19.5 ตัน/ไร่ ทั้งยังมีความหวานสูงโดยอ้อยปลูกมีความหวาน 15.4 ซีซีเอส อ้อยตอมีความหวาน 14.6 ซีซีเอส (วีระพล และคณะ, 2554) การผลิตอ้อยในพื้นที่ปลูกอ้อยภาคตะวันออกเฉียงเหนือส่วนใหญ่เป็นดินในกลุ่มชุดดิน 40 35 41 และ 44 ซึ่งมีเนื้อดินหยาบเป็นดินหลัก ตั้งแต่ดินทราย ถึงดินร่วนปนทราย มีสมบัติในการดูดยึดธาตุอาหารพืชและการอุ้มน้ำต่ำ (ปรีชา และคณะ, 2550) ทำให้มีผลต่อการไว้ตอได้ไม่นานเท่าดินที่เนื้อละเอียดกว่า ส่งผลให้เกษตรกรต้องปลูกอ้อยบ่อยขึ้น มีผลต่อต้นทุนการผลิตของเกษตรกร โดยที่อ้อยปลูกจะมีต้นทุนการผลิตประมาณ 12,000 บาทต่อไร่ ส่วนในอ้อยตอจะมีต้นทุนประมาณ 7,000 บาทต่อไร่ (ชุลีพรและกาญจนา, 2555) ทั้งยังเกิดการชะล้างธาตุอาหารพืชออกไปจากดินสูงกว่าดินเนื้อละเอียดด้วย ในการจัดการธาตุอาหารพืช จากงานทดลองของกอบเกียรติ (2559) ทำการศึกษาการจัดการปุ๋ยในดินเนื้อหยาบ ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่า อ้อยพันธุ์ขอนแก่น 3 ให้ผลตอบแทนคุ้มค่าแก่การลงทุนสูงสุดเมื่อใส่ปุ๋ยเคมีที่มีปริมาณธาตุอาหาร $N-P_2O_5-K_2O$ เท่ากับ 18-6-18 กิโลกรัมต่อไร่ และ การใช้ปุ๋ยพืชสด ปุ๋ยมูลไก่ และปุ๋ยชีวภาพสามารถใช้ผสมผสานร่วมกับปุ๋ยเคมีเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตและเพิ่มผลผลิตอ้อยได้ เช่น ปุ๋ยอินทรีย์ที่สามารถทดแทนปุ๋ยเคมีที่ใส่ให้อ้อย ทั้งในอ้อยปลูกและอ้อยตอ คือ น้ำจากโรงแป้ง อัตรา 50 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ รองลงมา ได้แก่ น้ำกากส่า อัตรา 50 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ และมูลไก่ อัตรา 1 ตันน้ำหนักแห้งต่อไร่

จังหวัดนครราชสีมาเป็นจังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีพื้นที่ 12.8 ล้านไร่ ซึ่งเป็นจังหวัดที่มีพื้นที่มากที่สุดของประเทศไทย คิดเป็นร้อยละ 3.99 ของประเทศ หรือ ร้อยละ 12.12 ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตั้งอยู่ละติจูด 15 องศาเหนือ ลองติจูด 102 องศาตะวันออก สภาพภูมิประเทศของ

จังหวัดมีทั้งที่เป็นภูเขาสูง ที่ราบลุ่ม พื้นที่ลูกคลื่นลอนตื้นและพื้นที่ลูกคลื่นลอนลึก เป็นพื้นที่เกษตรกรรม 8.93 ล้านไร่ ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่นาข้าว ที่เหลือเป็นพืชไร่ และพืชสวน โดยมีพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ คือ ข้าว มันสำปะหลัง ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และอ้อยโรงงาน โดยในปี พ.ศ. 2560 มีพื้นที่ปลูก 3.48, 1.51, 0.67 และ 0.67 ล้านไร่ ตามลำดับ พื้นที่ปลูกอ้อยของจังหวัดนครราชสีมาคิดเป็นร้อยละ 13 ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มากเป็นอันดับที่ 2 ของภาค หรือ อันดับ 5 ของประเทศ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562) โดยปลูกอ้อยใน 27 อำเภอ จาก 32 อำเภอของจังหวัด เมื่อพิจารณาตามความเหมาะสมต่อการปลูกอ้อยพบว่าส่วนใหญ่ปลูกในบริเวณที่มีความเหมาะสมปานกลาง (S2) เป็นพื้นที่มากที่สุด รองลงมาเป็น พื้นที่มีความเหมาะสมน้อย (S3) ไม่มีความเหมาะสม (N) และเหมาะสมมาก (S1) เป็นร้อยละ 53.70, 23.50, 22.33 และ 0.46 ตามลำดับ ในในฤดูการผลิต 2560/2561 มีผลผลิตอ้อยของจังหวัด 7.76 ล้านตัน ที่ผลผลิตอ้อยเฉลี่ย 11.71 ตัน/ไร่ ซึ่งสูงกว่าผลผลิตอ้อยเฉลี่ยของประเทศ (11.68 ตัน/ไร่) โดยมีโรงงานน้ำตาลในจังหวัด จำนวน 3 โรง มีกำลังการผลิตที่ได้รับอนุญาตรวม 80,500 ตันอ้อย/วัน และในฤดูการผลิต 2560/2561 สามารถรองรับผลผลิตได้ 12.23 ล้านตัน ซึ่งอ้อยส่วนหนึ่งนำเข้ามาจากจังหวัดใกล้เคียง (กองอุตสาหกรรมอ้อย น้ำตาลทราย และอุตสาหกรรมต่อเนื่อง, 2561 ; สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2562)

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมี

1. กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เกรดวิเคราะห์
2. อะซิโตน (Acetone) เกรดวิเคราะห์
3. เลดไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) เกรดวิเคราะห์
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์
5. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดวิเคราะห์
6. กรดไนตริก (HNO_3) เกรดวิเคราะห์
7. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์
8. กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เกรดอาหาร 85%
9. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เกรดวิเคราะห์
10. เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) เกรดวิเคราะห์
11. ออร์โทฟีแนนโทรลีน เกรดวิเคราะห์
12. เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) เกรดวิเคราะห์
13. แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) เกรดวิเคราะห์
14. แอมโมเนียมโมลิบเดต ($[(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O]$) เกรดวิเคราะห์
15. แอนติโมนีโพแทสเซียมตาร์เตรท ($KSbO.C_4H_4O_6$) เกรดวิเคราะห์
16. กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) เกรดวิเคราะห์
17. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) เกรดวิเคราะห์
18. แอมโมเนียมอะซิเตรต (NH_4OAc) เกรดวิเคราะห์
19. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเข้มข้น 1,000 mg/l
20. สารละลายมาตรฐานแคลเซียมเข้มข้น 1,000 mg/l
21. สารละลายมาตรฐานแมกนีเซียมเข้มข้น 1,000 mg/l
22. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์
23. กรดบอริก (Boric acid) เกรดวิเคราะห์

24. แอมโมเนียมเมตาวานาเดท (NH_4VO_3) เกรดวิเคราะห์
25. โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เกรดวิเคราะห์
26. สทรอนเชียมคลอไรด์ ($SrCl_2.6H_2O$) เกรดวิเคราะห์
27. กรดเปอร์คลอริก ($HClO_4$) เกรดวิเคราะห์

3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) (EDAX, LEO 1455 VP)
2. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (XRD) (Philips, PW 3040)
3. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก แอนาไลเซอร์ (TGA) (Perkin Elmer, Pyris 1 TGA)
4. เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) รุ่น (Perkin Elmer, FTIR Spectrum GX)
5. เครื่องอะตอมมิคแอบซอฟชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Shimadzu, AA-200)
6. เครื่องกลั่นไนโตรเจน (Velp, UDK130D)
7. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) (Cecil,3000)
8. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) (Hach, Sension+EC7)
9. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (EC meter) (Hach, Sension+PH3)
10. เครื่องวัดคลอโรฟิลล์ในใบพืช (Chlorophyll Meter) (Konica Minolta, SPAD-502 Plus)
11. เครื่องชั่งสารแบบละเอียด (Analytical balance) (Sartorius, BSA224S-CW, BSA3202S-CW)
12. เครื่องเขย่า (orbital shaker) (New Brunswick, Innova 23000)
13. เตาย่อยตัวอย่างพืช (Block digestion) (BKE, BKE500)
14. ตู้อบ (Oven) (Binder, FED400)
15. เวอร์เนียแคลิปเปอร์ (Mitutoyo, CD-8 ASX)
16. ไม้วัดระดับ (Staff) (CST 4m)
17. เทปวัดระยะ (Measuring tape) (Yamayo, Million50)
18. ตาชั่ง 7, 20 และ 60 kg
19. อ่างผสมปูน 175 l

3.3 วิธีดำเนินการ

3.3.1 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่

ประกอบด้วย 2 วิธีการ ได้แก่

3.3.1.1 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีอย่างง่าย

1) การเตรียมตัวอย่างเปลือกหอย

นำเปลือกของหอยเชอรี่ที่ได้จากหอยที่เอาเนื้อออกเพื่อแปรรูปเป็นเนื้อหอย มาทุบให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วล้างน้ำทำความสะอาดเบื้องต้นเพื่อแยกสิ่งสกปรกออก และกำจัดสารอินทรีย์ที่ปะปนมากับเปลือกหอยโดยแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 50% เป็นเวลา 6 h แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นผึ่งแดดให้แห้ง บดเปลือกหอยด้วยครกหิน ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh นำผงของแคลเซียมคาร์บอเนต และนำมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของตัวอย่างเปลือกหอยเชอรี่

สมบัติ	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
องค์ประกอบและปริมาณ	เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ (XRF)
สมบัติการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)
หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบ	ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตสโคปี (FT-IR)
สัณฐานวิทยา	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
สมบัติทางความร้อน	เทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์ (TGA)

2) การสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

การเตรียมสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต อ้างอิงตามวิธีการของ Boonchom (2009) โดยการผสม acetone เพื่อใช้เป็นตัวกลางในการลดอุณหภูมิของปฏิกิริยาและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ปริมาตร 250 ml ในผงของเปลือกหอยเชอรี่ 50 g โดยคนสารละลายตัวอย่างด้วย magnetic stirrer 500 rpm ตลอดเวลา จากนั้นเติมด้วย 70% w/w ของกรดฟอสฟอริก ปริมาตร 85 ml อย่างช้าๆ แล้วคนต่อเนื่องเป็นเวลา 15 min ปฏิกิริยาจะสิ้นสุดเมื่อไม่มีฟองก๊าซเกิดขึ้น จะได้สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตมีลักษณะเป็นผง ที่จะนำมาเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ ทั้งปริมาณและองค์ประกอบ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ด้วยวิธีอย่างง่าย

สมบัติ	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
องค์ประกอบและปริมาณ	เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ (XRF)
สมบัติการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)
หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบ	ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตสโคปี (FT-IR)
สัณฐานวิทยา	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.3.1.2 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีการใช้อนุภาคขนาดเล็ก

1) การเตรียมตัวอย่างเปลือกหอย

การเตรียมตัวอย่างเปลือกหอยเชอรี่ตามวิธีการเดียวกับในการทดลองที่ 3.3.1.1 โดยมีความแตกต่างในขั้นตอนการการบดตัวอย่างเปลือกหอยซึ่งจะละเอียดมากกว่า และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 400 mesh ซึ่งทำให้ได้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความละเอียดมากกว่าวิธีการอย่างง่าย

2) การสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

การเตรียมสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต โดยการใส่ acetone ปริมาตร 250 ml ลงในผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากข้อ 1 จำนวน 50.00 g อย่างรวดเร็ว พร้อมทั้งคนสารละลายที่ได้ตลอดเวลา จากนั้นค่อยๆ ใส่ 50% w/w ของกรดฟอสฟอริก ปริมาตร 60 ml ที่เตรียมได้จากกรดฟอสฟอริกเข้มข้น (84.6 % w/w) ลงในของผสมดังกล่าว และคนต่อเนื่องไปอีก 15 min ปล่อยทิ้งไว้ให้ตกตะกอนอีก 30 min หลังจากนั้นกรองเอาเฉพาะตะกอนด้วย suction pump และล้างด้วย acetone จำนวน 3 ครั้ง จากนั้นปล่อยให้แห้ง 24 h จะได้ตะกอนสีขาวของ สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต ที่จะนำมาเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต วิธีการใช้อนุภาคขนาดเล็ก

สมบัติ	เครื่องมือ/วิธีการวิเคราะห์
สมบัติการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)
หมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบ	ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตสโคปี (FT-IR)
สัณฐานวิทยา	กล้องจุลทรรศอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
สมบัติทางความร้อน	เทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์ (TGA)

3.3.2 การสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่เพื่อใช้ในการทดลอง

การการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่จะใช้เป็นปุ๋ยฟอสฟอรัส เพื่อทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีมาตรฐานที่ใช้ในการทดลองเพื่อการปลูกอ้อยในการทดลองครั้งนี้ จะเป็นสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ (ปุ๋ยเปลือกหอย) โดยประยุกต์จากกรรมวิธีของบรรจง (2559) โดยมีวิธีการดังนี้

1) การเตรียมเปลือกหอยเชอรี่ โดยนำเปลือกหอยเชอรี่ที่ทุบให้แตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำมาล้างทำความสะอาดเบื้องต้นเพื่อเอาสิ่งสกปรกออกด้วยน้ำสะอาด จากนั้นผึ่งแดดให้แห้ง หลังจากนั้นทำการบดเปลือกหอยให้มีขนาดเล็กกว่า 2 mm (10 mesh) จำนวน 50 kg

2) เตรียมสารละลายกรดฟอสฟอริก 70% w/w จากกรดฟอสฟอริกเกรดทางการค้า (85% w/w) จำนวน 85 l

3) นำเปลือกหอยที่เตรียมได้จากข้อ 1) และสารละลายกรดฟอสฟอริก 70% w/w มาผลิตปุ๋ยเปลือกหอย โดยในขั้นตอนการผสมจะทำในอ่างพลาสติกผสมปูนขนาด 175 l โดยใส่เปลือกหอยทั้งหมดลงในอ่างผสมก่อน แล้วค่อย ๆ ใส่สารละลายกรดฟอสฟอริก 70% w/w โดยแบ่งใส่ครั้งละ 5 l แล้วคนจนกว่าฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะยุบตัวลง จึงเติมสารละลายกรดลงไปเรื่อย ๆ จนครบจำนวน 85 l

4) เมื่อเติมสารละลายกรดครบตามปริมาตรและคนให้เข้ากันดีแล้ว จะได้ของแข็งที่มีลักษณะเป็นผงร่วน และมีความชื้นเล็กน้อย ทิ้งไว้ประมาณ 24 h เพื่อให้ทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ ก็จะได้ปุ๋ยเปลือกหอย ที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบประมาณ 24 %

การทดสอบการละลายของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่

ประกอบด้วย 3 วิธี ได้แก่

1) การทดสอบการละลายในน้ำ

ชั่งน้ำหนักของแคลเซียมฟอสเฟตที่เตรียมได้ 1 g ละลายในน้ำกลั่น 100 ml เขย่าด้วยความเร็ว 30-40 rpm ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 h นำสารละลายกรองผ่านกระดาษกรอง วัตแมน (Whatman filter paper) เบอร์ 5 แล้วนำกระดาษกรองอบไล่ความชื้นจนน้ำหนักของกระดาษกรองคงที่ นำมาหาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของกระดาษกรอง

2) การทดสอบการละลายใน 1 N ammonium citrate

ชั่งน้ำหนักของแคลเซียมฟอสเฟตที่เตรียมได้ 1 g ละลายใน1 N ammonium citrate pH 7.0 จำนวน 100 ml ที่อุณหภูมิ 65 ^{o}C เขย่าด้วยความเร็ว 30-40 rpm เป็นเวลา 1 h นำสารละลายกรองผ่าน

กระดาษกรองวัตแมน เบอร์ 5 แล้วนำกระดาษกรองอบไล่ความชื้นจนน้ำหนักของกระดาษกรองคงที่ นำมาหาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของกระดาษกรอง

3) การทดสอบการละลายใน 2% citric acid

ชั่งน้ำหนักของแคลเซียมฟอสเฟตที่เตรียมได้ 1 g ละลายใน 2% citric acid 100 ml เขย่าด้วยความเร็ว 30-40 rpm แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 h นำสารละลายกรองผ่านกระดาษกรองวัตแมน เบอร์ 5 แล้วนำกระดาษกรองอบไล่ความชื้นจนน้ำหนักของกระดาษกรองคงที่ นำมาหาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของกระดาษกรอง แล้วประเมินหาการละลายของแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้ ในแต่ละตัวทำละลาย (Chien, 1993) และหาปริมาณ total phosphorus ที่ได้จากการกรองโดยใช้วิธี Vanadomolybdate วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 420 nm (Barton, 1948)

3.3.3 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา

ประกอบด้วย 2 การทดลองย่อย ได้แก่

3.3.3.1 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา)

1) การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ split plot in CRD โดยมีอายุของอ้อยตอเป็นปัจจัยหลัก (main plot) และชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยเป็นปัจจัยรอง (subplot) ปัจจัยหลักที่เป็นอายุของอ้อยตอ คือ อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 ปัจจัยรองเป็นชนิดของปุ๋ย คือ ปุ๋ยเคมี และปุ๋ยฟอสฟอรัสที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ (ปุ๋ยเปลือกหอย) การทดลองประกอบด้วย 4 ตำรับ จำนวน 4 ซ้ำ รวม 16 แปลงย่อย

2) การเตรียมปุ๋ยที่ใช้ในการทดลอง มี 2 กรรมวิธี คือ

2.1) ปุ๋ยเคมี อัตราส่วนการใช้ตามกรมวิชาการเกษตรแนะนำสำหรับการใส่ปุ๋ยอ้อยในเขตดินทราย (Department of Agriculture, 2009) โดยใช้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 100 กิโลกรัมต่อไร่ (kg/ไร่) ซึ่งเป็นอัตรา สูตร 15-15-15 เกรดทางการค้ามาตรฐาน ที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด (ปุ๋ยเคมี)

2.2) ปุ๋ยเปลือกหอย นำปุ๋ยที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.2 มาผสมกับปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-60) เพื่อให้ได้ปุ๋ยผสมคลุกเคล้าที่มีสูตรปุ๋ย เท่ากับ 15-15-15 โดยมีสัดส่วน ดังนี้

ปุ๋ยยูเรีย 32.60 kg

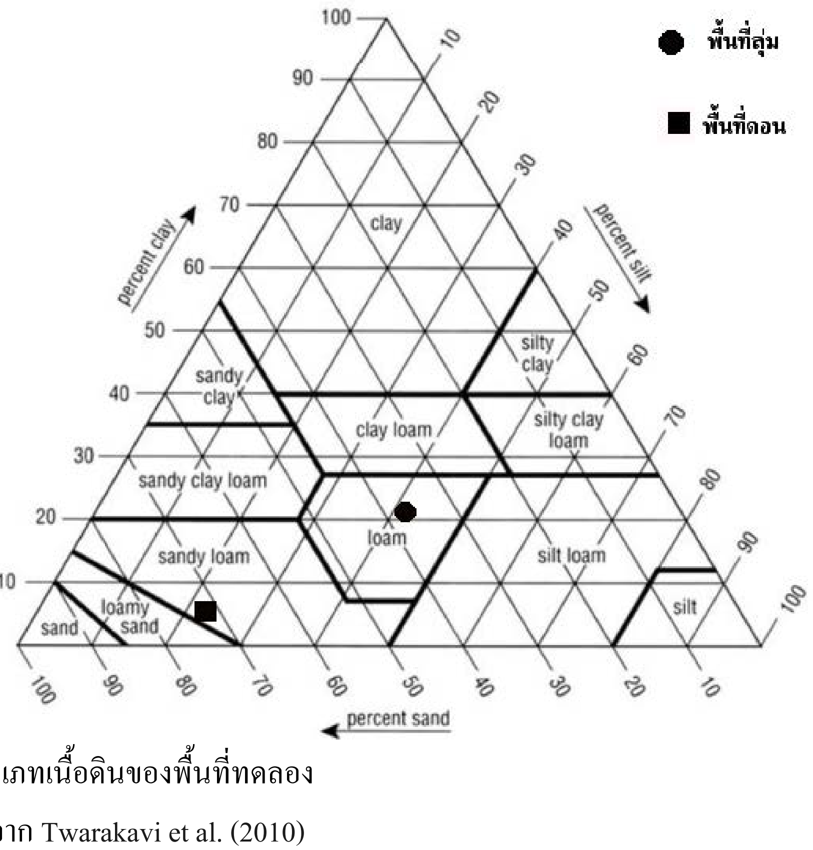
ปุ๋ยเปลือกหอย (54.75 % P_2O_5) 27.40 kg

ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 25.00 kg

โดยปุ๋ยผสมคลุกเคล้าที่ได้จะมีน้ำหนักรวม 85.0 kg ซึ่งปุ๋ยผสมนี้จะเตรียมก่อนการใช้งาน และไม่เติมสารเติมเต็ม (filler) ทำให้ได้อัตราการใช้ปุ๋ยเปลือกหอย เท่ากับ 85.0 kg/ไร่ โดยมีธาตุอาหารพืชเท่ากับปุ๋ยเคมี

3) การเตรียมสถานที่ทดลอง

3.1) ดำเนินการทดลองในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา) ทำการทดลองในแปลงอ้อยของเกษตรกรพื้นที่หมู่ที่ 4 ตำบลแหลมทอง อำเภอหนองบุญมาก จังหวัดนครราชสีมา ลักษณะภูมิประเทศเป็นพื้นที่ค่อนข้างราบเรียบ มีความลาดเทเล็กน้อย (<1 %) สามารถจัดการการระบายน้ำได้ดี การใช้ประโยชน์พื้นที่เดิมใช้ทำนาข้าว และเมื่อเปลี่ยนการปลูกพืชมาเป็นอ้อย เกษตรกรได้ทำการปรับพื้นที่โดยการเอาคันนาออก ให้สามารถระบายน้ำออกท้ายแปลงได้ เมื่อมีฝนตกมากจนมีน้ำขัง เนื้อดินเป็นดินร่วน (loam) ประกอบด้วย sand 37% silt 42% และ clay 21% (ภาพที่ 3.1) ทำการทดลองในฤดูการผลิตอ้อย 2559/2560



ภาพที่ 3.1 ประเภทเนื้อดินของพื้นที่ทดลอง

ที่มา: ดัดแปลงจาก Twarakavi et al. (2010)

3.2) ขนาดของแปลงทดลอง

พื้นที่ปลูกอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 แต่ละแปลงขนาดเท่ากับ 32 x 40 m (1,280 m^2) รวมสองอายุอ้อย 2,560 m^2 ระยะห่างระหว่างแถวอ้อย 1.30 m แบ่งเป็นแปลงย่อยจำนวน 16 แปลงย่อย แต่ละแปลงย่อยมีขนาดกว้าง 3.90 m (3 แถว) ยาว 40 m การวัดผลจะใช้เฉพาะแถวที่ 2 ของแต่ละแปลงย่อย และมีขนาดของพื้นที่เก็บเกี่ยวเท่ากับ 1.30 x 10.00 m (13 m^2)

3.3) การจัดการพื้นที่

พื้นที่ปลูกอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 หลังการเก็บเกี่ยวอ้อยตอ 1 และตอ 2 ในฤดูการผลิต 2558/2559 ด้วยการใช้แรงงานคนในเดือนกุมภาพันธ์ 2559 หลังจากนั้น 1 สัปดาห์ ทำการตัดแต่งตออ้อยให้ชิดผิวดินด้วยด้วยใบมีดหมุน (rotary slasher) ที่ติดตั้งกับรถแทรกเตอร์เพื่อให้หน่ออ้อยที่งอกขึ้นใหม่เป็นหน่อใต้ดิน แล้วทำการตัดรากเก่าของอ้อยด้วยไถสิ่วที่ระดับความลึก 30 cm หลังจากนั้นจัดการความชื้นในดิน เพื่อให้การงอกของอ้อยสม่ำเสมอ โดยหากความชื้นในดินต่ำกว่าที่กำหนดจะทำการให้น้ำแก่อ้อย หากบริเวณใดที่อ้อยไม่งอกหรืออ้อยตายจะทำการปลูกซ่อมด้วยต้นอ้อยที่เพาะไว้ในถุงเพาะชำให้เต็มระยะที่ว่างอยู่ การจัดการวัชพืชในแปลงโดยใช้สารเคมีเมื่อมีวัชพืชขึ้นแล้วใช้แรงงานคนเก็บวัชพืชส่วนที่เหลือจากการใช้สารเคมี ตามวิธีการปลูกอ้อยที่ดี (GAP sugarcane) (National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, 2010)

3.4) การจัดการน้ำในแปลงทดลอง

ทำการติดตั้งระบบการให้น้ำแบบหยดบนผิวดิน 1 แถวอ้อย ต่อ 1 สายน้ำหยด โดยใช้สายน้ำหยดชนิดท่อน้ำหยด (drip hose) ขนาด 16 mm ที่มีระยะห่างระหว่างหัวน้ำหยด 30 cm อัตราการไหล 2.0 l/h โดยการให้น้ำจะพิจารณาจากระดับความชื้นของดิน คือ จะให้น้ำเมื่อความชื้นในดินลดลงเหลือร้อยละ 60 ของระดับความชื้นที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (available water capacity, AWCA) โดยใช้เครื่องวัดปริมาณความชื้นในดินแบบ embedded-coplanar strip ที่ความลึก 30 cm ที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์เก็บข้อมูล และส่งข้อมูลที่วัดในแปลงทดลองประกอบด้วย ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิของอากาศ โดยการให้น้ำในแต่ละครั้งจะใช้เวลา 6 h หรือ คิดเป็นความสูงน้ำ 30 mm

การหาปริมาณการใช้น้ำของอ้อย (ETc) ในพื้นที่ลุ่ม ได้จากปริมาณการระเหยน้ำจากถาดวัดการระเหยแบบเอ (Epan) ซึ่งอ่านค่าจากอุปกรณ์ที่ติดตั้ง ณ สถานีอุตุนิยมวิทยาอุทกโชคชัย อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งอยู่ห่างจากพื้นที่ทดลอง 14.15 km ตามสมการ 3.1

$$ETc = K'p. \ Epan. \ Kc \qquad (3.1)$$

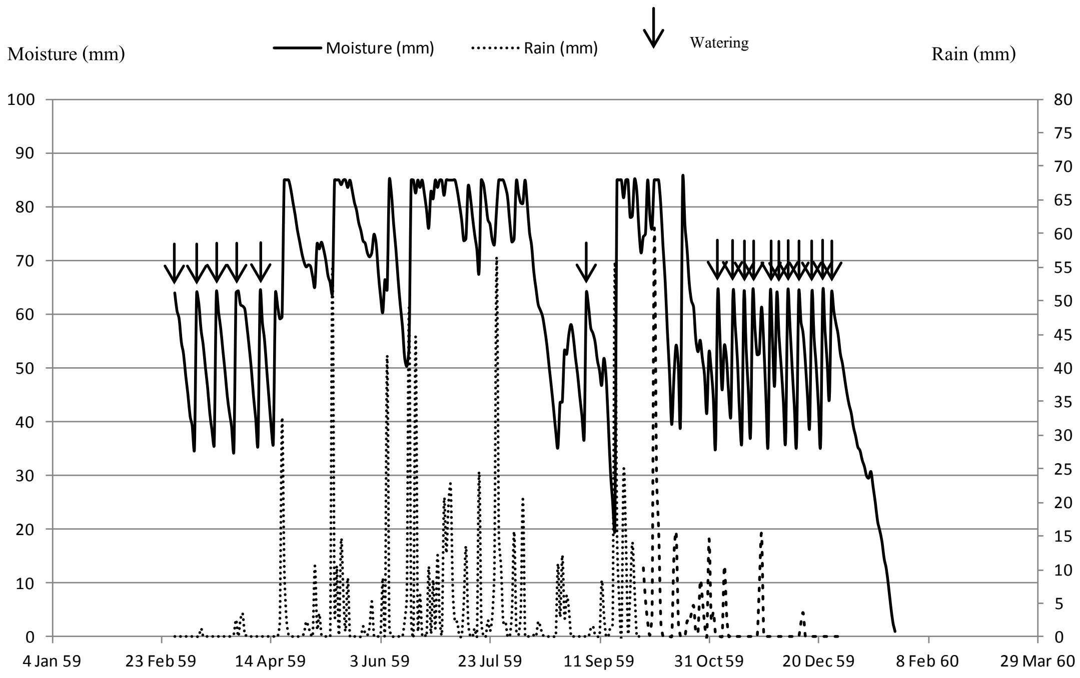
เมื่อ ETc = ปริมาณการใช้น้ำของอ้อย

K´p = สัมประสิทธิ์ของถาดวัดการระเหยแบบ เอ (0.90)

Epan = ปริมาณการระเหยน้ำจากถาดวัดการระเหยแบบ เอ

Kc = สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อย

ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของอ้อยตอ พันธุ์ขอนแก่น 3 จากกอบเกียรติ และคณะ (2555) และ Win et al. (2014) คือ 0.69, 0.39, 0.84, 2.28 และ 0.75 เมื่ออายุอ้อย 1-30 วัน ที่เป็นระยะตั้งต้น, 31-104 วัน ที่เป็นระยะพักตัว, 105-208 วัน ที่เป็นระยะแตกกอ, 209-312 วัน ที่เป็นระยะสร้างน้ำตาล และมากกว่า 312 วัน ที่เป็นระยะสุกแก่ ตามลำดับ โดยเริ่มให้น้ำหลังการตัดแต่งตออ้อยถึงก่อนการเก็บเกี่ยวอ้อย 2 เดือน คือในอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ลุ่ม จะให้น้ำตั้งแต่เดือนมีนาคม 2559 ถึงธันวาคม 2559



ภาพที่ 3.2 ความชื้น ฝน และการให้น้ำแก่อ้อยในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา)

ปริมาณฝนที่ตกตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2559 ถึงมกราคม 2560 ทั้งหมด 1,134.50 mm โดยเดือนกรกฎาคม 2559 มีปริมาณฝนมากที่สุด คือ 240.8 mm ส่วนเดือนกุมภาพันธ์ 2559 มีฝนตกน้อยที่สุด คือ 2.4 mm มีการให้น้ำแก่อ้อยในพื้นที่ลุ่มทั้งหมด 17 ครั้ง ใน 5 เดือน คือ มีนาคม เมษายน กันยายน พฤศจิกายน และธันวาคม 2559 รวมเป็นปริมาณน้ำ 451.27 mm โดยเดือนที่มีการให้น้ำมากที่สุดคือ ธันวาคม 2559 ปริมาณ 145.43 mm (ภาพที่ 3.2) จากการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของอ้อย

(ETc) เท่ากับ 1,296.01 mm โดยความต้องการใช้น้ำของอ้อยตั้งแต่เดือนมีนาคม 2559 ถึงมกราคม 2560 คือ 109.61, 97.27, 56.35, 101.68, 107.17, 104.30, 155.14, 211.89, 70.88, 191.96 และ 77.36 mm ตามลำดับ

3.5) การจัดการธาตุอาหารพืช

3.5.1) แปลงทดลองปุ๋ยเคมี เป็นแปลงปลูกอ้อยที่มีการให้ปุ๋ยแบบเกษตรกรทั่วไป (ปุ๋ยเคมี) การใส่ปุ๋ยในแปลงอ้อยใช้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 100 kg/ไร่ แบ่งใส่ 3 ครั้ง ซึ่งดัดแปลงจากวิธีการของวลัยภรณ์ และคณะ (2555) โดยปุ๋ยเคมีแบ่งใส่ปุ๋ยครั้งละ 20, 60 และ 20 kg/ไร่ ในการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ การใส่ปุ๋ยเคมีครั้งแรกด้วยการฝังลึกไปพร้อมกันกับการตัดรากอ้อยในอัตรา 20 kg/ไร่ ส่วนที่เหลือจะใส่จะแบ่งใส่ 2 ครั้ง เมื่ออ้อยมีอายุ 4 และ 6 เดือน อัตรา 60 และ 20 kg/ไร่ ตามลำดับ โดยการหว่านเป็นแถบเฉพาะร่องของอ้อย

3.5.2) แปลงทดลองปุ๋ยเปลือกหอย เป็นแปลงปลูกอ้อยที่ให้ปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟตที่ได้จากการสังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ (ปุ๋ยเปลือกหอย) การใส่ปุ๋ยในแปลงอ้อยจะแบ่งใส่ 3 ครั้ง เช่นเดียวกันกับปุ๋ยเคมี คือ ครั้งละ 20, 45 และ 20 kg/ไร่ ในการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ แต่จะแตกต่างกันที่จะเป็นการให้โดยวิธีการหว่านเป็นแถบเฉพาะร่องของอ้อยทุกครั้ง โดยการให้ครั้งที่ 1 อัตรา 20 kg/ไร่ ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 อัตรา 45 และ 20 kg/ไร่ ตามลำดับ

3.3.3.2 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่ดอน (สภาพไร่)

1) การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ split plot in CRD โดยมีอายุของอ้อยตอเป็นปัจจัยหลัก (main plot) และชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยเป็นปัจจัยรอง (subplot) ปัจจัยหลักที่เป็นอายุของอ้อยตอ คือ อ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 ปัจจัยรองเป็นชนิดของปุ๋ย คือ ปุ๋ยเคมี และปุ๋ยฟอสฟอรัสที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ (ปุ๋ยเปลือกหอย) การทดลองประกอบด้วย 4 ตำรับ จำนวน 4 ซ้ำ รวม 16 แปลงย่อย

2) การเตรียมปุ๋ยที่ใช้ในการทดลอง มี 2 กรรมวิธี เช่นเดียวกันกับ 3.3.3.1

3) การเตรียมสถานที่ทดลอง

3.1) ดำเนินการทดลองในพื้นที่ดอน (สภาพไร่) โดยทำการทดลองในแปลงอ้อยของเกษตรกรพื้นที่หมู่ที่ 4 ตำบลแหลมทอง อำเภอหนองบุญมาก จังหวัดนครราชสีมา มีสภาพภูมิประเทศเป็นพื้นที่ลูกคลื่นลอนลาดเล็กน้อย มีความลาดชัน 2% ไม่มีปัญหาการท่วมขังของน้ำ การระบายน้ำดีมาก การใช้ประโยชน์พื้นที่เดิมก่อนการปลูกอ้อย เกษตรกรใช้ทำไร่มันสำปะหลัง เนื้อดิน

เป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) ประกอบด้วย sand 72% silt 22% และ clay 6% (ภาพที่ 3.1) และหน้าดินเป็นดินลึก

3.2) การปลูกอ้อยในพื้นที่ดอน (สภาพไร่) พันธุ์อ้อยที่ใช้ในการทดลองเป็นพันธุ์ขอนแก่น 3 (94-2-200) โดยการทดสอบการใช้ปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟตที่ผลิตได้จากเปลือกหอยเชอรี่เปรียบเทียบกับปุ๋ยเคมีที่เกษตรกรใช้ทั่วไป โดยต้องเป็นพื้นที่ที่มีแหล่งน้ำและสามารถจัดการการให้น้ำได้ตลอดการทดลอง ในฤดูการผลิตอ้อย 2559/2560

3.3) ขนาดของแปลงทดลอง

พื้นที่ปลูกอ้อยตอ 1 แปลงขนาดเท่ากับ 32 x 40 m (1,280 m^2) ระยะห่างระหว่างแถวอ้อย 1.30 m แบ่งเป็นแปลงย่อยจำนวน 8 แปลงย่อย แต่ละแปลงย่อยมีขนาดกว้าง 3.90 m (3 แถว) ยาว 40 m การวัดผลจะใช้เฉพาะแถวที่ 2 ของแต่ละแปลงย่อย และมีขนาดของพื้นที่เก็บเกี่ยวเท่ากับ 1.30 x 10.00 m (13 m^2) และพื้นที่อ้อยตอ 2 แปลงขนาดเท่ากับ 36 x 40 m (1,440 m^2) ระยะห่างระหว่างแถวอ้อย 1.50 m แบ่งเป็นแปลงย่อยจำนวน 8 แปลงย่อย แต่ละแปลงย่อยมีขนาดกว้าง 4.50 m (3 แถว) ยาว 40 m การวัดผลจะใช้เฉพาะแถวที่ 2 ของแต่ละแปลงย่อย และมีขนาดของพื้นที่เก็บเกี่ยวเท่ากับ 1.50 x 10.00 m (15 m^2)

3.4) การจัดการพื้นที่

พื้นที่อ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 หลังการเก็บเกี่ยวอ้อยปลูกและอ้อยตอ 1 ในฤดูการผลิต 2558/2559 ในช่วงเดือนธันวาคม 2558 ด้วยการใช้แรงงานคนแล้วเสร็จ หลังจากนั้น 1 สัปดาห์ทำการตัดแต่งตออ้อยให้ชิดผิวดินด้วยด้วยใบมีดหมุน (rotary slasher) ที่ติดตั้งกับรถแทรกเตอร์เพื่อให้หน่ออ้อยที่งอกขึ้นใหม่เป็นหน่อใต้ดิน แล้วทำการตัดรากเก่าของอ้อยด้วยไถสิ่วที่ระดับความลึก 30 cm หลังจากนั้นจะจัดการความชื้นในดิน เพื่อให้การงอกของอ้อยสม่ำเสมอ โดยหากความชื้นในดินต่ำกว่าที่กำหนดจะทำการให้น้ำแก่อ้อย หากบริเวณใดที่อ้อยไม่งอกหรืออ้อยตายจะทำการปลูกซ่อมด้วยต้นอ้อยที่เพาะไว้ในถุงเพาะชำให้เต็มระยะที่ว่างอยู่ การจัดการวัชพืชในแปลงโดยใช้สารเคมีเมื่อมีวัชพืชขึ้นแล้วใช้แรงงานคนเก็บวัชพืชส่วนที่เหลือจากการใช้สารเคมี ตามวิธีการปลูกอ้อยที่ดี (GAP)

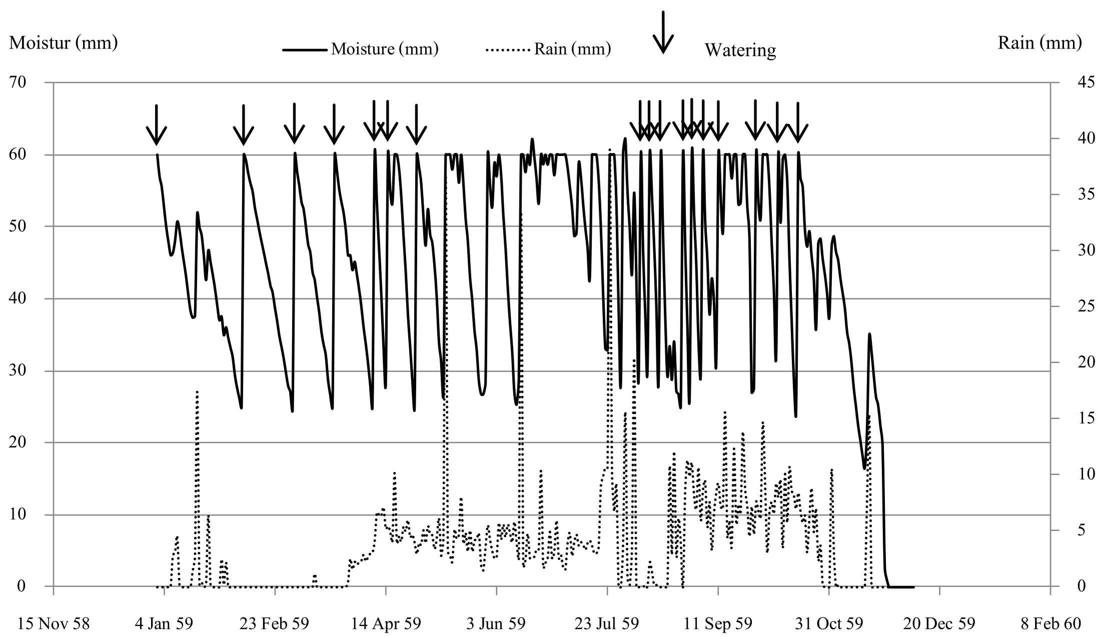
3.5) การจัดการน้ำในแปลงทดลอง

การจัดการน้ำในแปลงทดลอง ทำการติดตั้งระบบการให้น้ำแบบร่องคู (furrow) โดยการปล่อยน้ำจากท่อส่งน้ำหัวแปลงให้ไหลตามร่องอ้อยไปยังท้ายแปลง การให้น้ำจะพิจารณาจากระดับความชื้นของดิน คือ จะให้น้ำเมื่อความชื้นในดินลดลงเหลือร้อยละ 60 ของระดับความชื้นที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (available water capacity, AWCA) โดยใช้เครื่องวัดปริมาณความชื้นใน

ดินแบบ embedded-coplanar strip ที่ความลึก 30 cm ที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์เก็บข้อมูล และส่งข้อมูลที่วัดในแปลงทดลองประกอบด้วย ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิของอากาศ

การหาปริมาณการใช้น้ำของอ้อย (ETc) ในพื้นที่ดอนจะทำเช่นเดียวกันกับในพื้นที่ลุ่ม และการให้น้ำแก่อ้อยจะเริ่มให้น้ำตั้งแต่หลังการตัดแต่งตออ้อยถึงก่อนการเก็บเกี่ยวอ้อย 2 เดือน คือ ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงตุลาคม 2559

ปริมาณฝนที่ตกตั้งแต่เดือนธันวาคม 2558 ถึงพฤศจิกายน 2559 รวม 1,161.30 mm โดยเดือนกรกฎาคม 2559 มีปริมาณฝนมากที่สุด คือ 240.8 mm ส่วนเดือนธันวาคม 2558 มีฝนตกน้อยที่สุด คือ 1.4 mm มีการให้น้ำแก่อ้อยในพื้นที่ลุ่มทั้งหมด 17 ครั้ง ใน 8 เดือน คือ มกราคม กุมภาพันธ์ มีนาคม เมษายน มิถุนายน สิงหาคม กันยายน และตุลาคม 2559 รวมเป็นปริมาณน้ำ 623.83 mm โดยเดือนที่มีการให้น้ำมากที่สุดคือ สิงหาคม 2559 ปริมาณ 159.50 mm (ภาพที่ 3.3) จากการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของอ้อย (ETc) เท่ากับ 1,459.27 mm โดยความต้องการใช้น้ำของอ้อยตั้งแต่เดือนมกราคมถึงพฤศจิกายน 2559 คือ 68.15, 43.88, 66.79, 123.06, 119.28, 101.68, 156.67, 276.41, 220.59, 211.89 และ 70.88 mm ตามลำดับ



ภาพที่ 3.3 ความชื้น ฝน และการให้น้ำแก่อ้อยในพื้นที่ดอน (สภาพไร่)

3.6) การจัดการธาตุอาหารพืช

3.6.1) แปลงทดลองปุ๋ยเคมี ทำเช่นเดียวกับการทดลองปุ๋ยเคมีในพื้นที่ลุ่ม

3.6.2) แปลงทดลองปุ๋ยเปลือกหอย ทำเช่นเดียวกับการทดลองปุ๋ยเปลือกหอยในพื้นที่ลุ่ม

3.3.3.3 การบันทึกข้อมูล

1) ข้อมูลดิน

ทำการเก็บตัวอย่างดินก่อนการใส่ปุ๋ย และหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย ที่ระดับความลึก 0-30 cm เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน ดังต่อไปนี้

1.1) ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (soil pH) โดยใช้อัตราส่วนดิน : น้ำ เท่ากับ 1 : 5 ด้วยเครื่อง pH meter (potention metric method) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

1.2) ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (electrical conductivity : EC) โดยใช้อัตราส่วนดิน : น้ำ เท่ากับ 1 : 5 ด้วยเครื่อง electrical conductivity meter (Rhoades, 1996)

1.3) ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (soil organic matter; OM) โดยวิธี wet oxidation ของ Walkley and Black (1934)

1.4) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P in soil) โดยวิธี Bray II ของ Bray and Kurtz (1945) วัดความเข้มข้นสีของสารละลายด้วยเครื่อง spectrophotometer

1.5) ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K, Ca และ Mg) โดยสกัดดินด้วย ammonium acetate ความเข้มข้น 1.0 M วัดด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer, AAS (Sumner and Miller, 1996)

2) ข้อมูลพืช

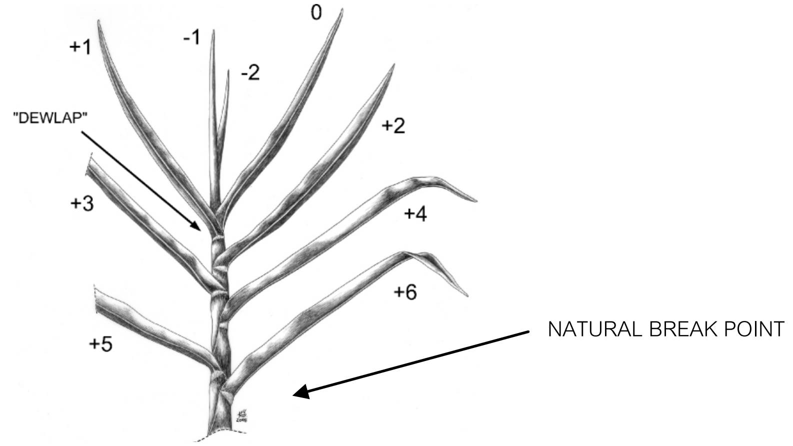
2.1) ข้อมูลการเจริญเติบโตของอ้อย

วัดข้อมูลจากต้นอ้อยในพื้นที่ของแปลงย่อย โดยใช้เฉพาะแถวที่ 2 (แถวกลาง) จากตัวแทนที่สุ่มเลือกจำนวน 10 ต้น จากความยาว 10 m โดยเว้นระยะหัวแปลงและท้ายแปลงไม่น้อยกว่าด้านละ 5 m พร้อมทั้งติดเครื่องหมายและระบุหมายเลขของแต่ละต้นที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างใบและใช้วัดการเจริญเติบโต ทำการวัดการเจริญเติบโตของอ้อย เมื่ออายุ 4 และ 8 เดือน หลังจากการเก็บเกี่ยวอ้อยในฤดูการผลิต 2558/2559 ประกอบด้วย

2.2.1) ความสูงต้นอ้อย วัดจากระดับผิวดินถึงคอใบสูงสุด (top visible dewlap) ดังภาพที่ 3.4

2.2.2) เส้นผ่าศูนย์กลางลำ วัดที่ส่วนกลางปล้อง โดยวัด 2 ตำแหน่ง คือ ปล้องสูงสุด และปล้องต่ำสุด แล้วหาค่าเฉลี่ย

2.2.3) ค่าความเขียวใบ (SPAD value) ของใบอ้อย โดยวัดด้วยเครื่อง chlorophyll meter (Konica Minolta Co., Ltd., Japan : SPAD-502 Plus model) ที่ใบที่ 3 จำนวน 3 จุด คือ โคนใบ กลางใบ และปลายใบ แล้วหาค่าเฉลี่ย



ภาพที่ 3.4 ตำแหน่งการวัดข้อมูลของอ้อย
ที่มา: ดัดแปลงจาก Cheavegatti-Gianotto et, al. (2011)

2.2.4) จำนวนลำของอ้อยต่อไร่ นับจำนวนลำอ้อยทั้งหมด โดยไม่รวมหน่อที่ไม่มีลำต้น ของแถวที่ 2 (แถวกลาง) ความยาว 10 m จะได้จำนวนลำต่อพื้นที่ 13 m^2 (SN13) ตามสมการ 3.2a ส่วนในแปลงอ้อยตอ 2 ในพื้นที่ดอนจะใช้พื้นที่ 15 m^2 (SN15) ดังสมการ 3.2b

จำนวนลำ/ไร่ = SN13 x 123.08 (3.2a)

= SN15 x 106.67 (3.2b)

2.2) ปริมาณธาตุอาหารพืชในใบอ้อย

เก็บตัวอย่างใบอ้อยจากใบที่ 3 นับจากใบที่คอใบสูงสุด (Top visible dewlap) (ภาพที่ 3.4) จากต้นอ้อยที่เป็นตัวแทนที่สุ่มเลือกจำนวน 10 ต้น ในระยะความยาว 10 m โดยเว้นระยะหัวแปลงและท้ายแปลงไม่น้อยกว่าด้านละ 5 m ของแถวกลางในแปลงย่อย พร้อมทั้งติดเครื่องหมายและระบุหมายเลขของแต่ละต้นที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างใบและการเจริญเติบโต ในเดือนที่ 4 และ 8 หลังการเก็บเกี่ยวอ้อยฤดูก่อน ใช้วิธีการเก็บตัวอย่างใบอ้อยของ Sugar Research Australia (2013) จะได้ตัวอย่าง

ทั้งหมด 32 ตัวอย่าง (พื้นที่ลุ่ม 16 ตัวอย่าง และพื้นที่ดอน 16 ตัวอย่าง) นำตัวอย่างที่ได้เข้าอบที่ 65–70 ^{o}C จนแห้งและบดละเอียด เพื่อนำไปวิเคราะห์ธาตุอาหารพืช โดยการย่อยตัวอย่างใบด้วย H_2SO_4 เข้มข้นใน digestion block และกลั่นหาไนโตรเจน (N) โดย วิธี Kjedahl และย่อยตัวอย่างใบด้วยกรดผสมเข้มข้นระหว่าง HNO_3 และ $HClO_4$ แล้วนำสารที่ย่อยได้มาหาฟอสฟอรัส โดยวิธี Vanadomolybdate โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) โดยใช้เครื่อง AAS (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

2.3) ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของอ้อย

เมื่ออ้อยถึงอายุเก็บเกี่ยว จะทำการตัดต้นอ้อยชิดผิวดินเพื่อเก็บตัวอย่างต้นอ้อย ที่เป็นตัวแทนในการวัดการเจริญเติบโตของอ้อยในแต่แปลงย่อย จำนวน 10 ต้น มาวัดผลดังต่อไปนี้

2.3.1) ความยาวลำ วัดโคนถึงจุดหักธรรมชาติ (natural break point)

2.3.2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำ โดยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่บริเวณกลางปล้องอ้อย ที่ตำแหน่งโคน กึ่งกลาง และปลายลำอ้อย

2.3.3) น้ำหนักลำอ้อย นำลำอ้อยมาชั่งน้ำหนักสด

ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของอ้อย ที่วัดได้จากอ้อยที่เก็บเกี่ยวจากแถวที่ 2 (แถวกลาง) ความยาว 10 m ของแต่ละแปลงย่อย เพื่อนำมาวัดผลดังนี้

2.2.4) จำนวนลำของอ้อยต่อไร่ นับจำนวนลำอ้อยทั้งหมด โดยไม่รวมหน่อที่ไม่มีลำต้น ที่ความยาว 10 m จะได้จำนวนลำต่อพื้นที่ 13 m^2 (SN13) ตามสมการ 3.3a ส่วนในแปลงอ้อยตอ 2 ในพื้นที่ดอนจะใช้พื้นที่ 15 m^2 (SN15) ดังสมการ 3.3b

$$\text{จำนวนลำ/ไร่} = SN13 \times 123.08 \quad (3.3a)$$

$$= SN15 \times 106.67 \quad (3.3b)$$

2.2.5) ผลผลิตอ้อยต่อไร่ นำอ้อยที่เก็บเกี่ยวในแถวกลางระยะ 10 m รวมกับ 10 ต้นที่นำมาวัดการเจริญเติบโตด้วย มาตัดยอด ณ จุดหักธรรมชาติ และกำจัดใบและกาบออกให้หมดแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก ซึ่งจะเป็นน้ำหนักต่อพื้นที่ 13 m^2 (WT13) ดังสมการที่ 3.4a และน้ำหนักต่อพื้นที่ 15 m^2 (WT15) ดังสมการที่ 3.4b จากนั้นจะคำนวณเป็นผลผลิตอ้อยต่อไร่ เป็น ตัน/ไร่

$$\text{ผลผลิตอ้อย/ไร่} = (WT13 \times 123.08)/1,000 \quad (3.4a)$$

$$= (WT13 \times 106.67)/1,000 \quad (3.4b)$$

2.2.6) องค์ประกอบของผลผลิตน้ำตาล ทำการสุ่มเลือกตัวอย่างอ้อยจำนวน 5 ลำ จากอ้อยจำนวน 10 ต้น ที่ใช้ในการวัดการเจริญเติบโตของแต่ละแปลงย่อย เพื่อมาวัด commercial cane sugar (CCS) โดยทำการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์โพลในน้ำอ้อยที่หีบออกมา (P) เปอร์เซ็นต์บริกซ์ในน้ำอ้อยที่หีบออกมา (B) และเปอร์เซ็นต์ไฟเปอร์ในอ้อย (F) แล้วนำมาคำนวณเป็นค่า CCS จากสูตร Hunsigi (1993) ดังสมการ 3.5

$$CCS = \frac{3}{2}P\left[1 - \frac{F+5}{100}\right] - \frac{1}{2}B\left[1 - \frac{F+3}{100}\right] \quad (3.5)$$

ผลผลิตของน้ำตาล หาได้จากการคำนวณจากค่า CCS ของอ้อยและน้ำหนักสดของอ้อยในแต่ละแปลงย่อย มีหน่วยเป็น ตัน/ไร่ โดยใช้สมการ 3.6

$$\text{ผลผลิตของน้ำตาล} = \frac{CCS \text{ x ผลผลิตอ้อยต่อไร่}}{100} \quad (3.6)$$

3.3.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

3.3.3.5 ประเมินต้นทุนการผลิต และผลตอบแทนจากการปลูกอ้อย

ทำการเก็บข้อมูลต้นทุนการผลิตอ้อย ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการผลิตอ้อยเบื้องต้น ซึ่งจะเป็นค่าใช้จ่ายในการดูแล บำรุงอ้อยตอ ประกอบด้วย ค่าแรงงาน ค่าวัสดุสารเคมี ค่าจ้างเครื่องจักรกลการเกษตร ค่าระบบการให้น้ำ ค่าพลังงาน และค่าเก็บเกี่ยวและขนส่ง ซึ่งค่าใช้จ่ายทั้งหมดยกเว้นค่าปุ๋ยจะเป็นค่าใช้จ่ายอัตราเดียวกันในทุกแปลง ส่วนค่าเก็บเกี่ยวและขนส่งอ้อยจะเป็นอัตราที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักผลผลิตอ้อยสด และค่าปุ๋ยจะคิดตามราคาตลาดในฤดูการผลิต 2559/2560

1) ค่าแรงงาน ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการฉีดยากำจัดวัชพืช ดายหญ้า ใส่ปุ๋ยและเตรียมปุ๋ย

2) ค่าวัสดุสารเคมี ประกอบด้วย ค่าปุ๋ย และสารเคมีกำจัดวัชพืช

3) ค่าจ้างเครื่องจักรกล ประกอบด้วย ค่าจ้างรถแทรกเตอร์ตัดรากเก่า และตัดแต่งตออ้อย

ผลตอบแทนที่ได้จากการผลิตอ้อย จะคิดจากราคาขายอ้อยเบื้องต้นที่เกษตรกรได้รับจากการขายผลผลิตเป็นจำนวนตามน้ำหนักอ้อยสดในฤดูการผลิต 2559/2560 รวมกับค่าตอบแทนที่ได้จากองค์ประกอบของผลผลิตน้ำตาล (CCS) ที่เกิดจากคุณภาพของผลผลิตอ้อย โดยวิเคราะห์เป็นผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ในรูปของผลตอบแทนต่อค่าลงทุน (B/C ratio)

3.4 ระยะเวลาดำเนินงาน

2 ปี

3.5 สถานที่ทำการวิจัย

คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ และแปลงทดลองในพื้นที่หมู่ที่ 4 ตำบลแหลมทอง อำเภอหนองบุญมาก จังหวัดนครราชสีมา

บทที่ 4
ผลการวิจัย

4.1 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีอย่างง่าย

4.1.1 สมบัติทางเคมีของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

เปลือกหอยเชอรี่เมื่อนำมาผ่านกระบวนการเตรียมตั้งแต่การทำความสะอาดเบื้องต้น และแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้น 50 % เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ปะปนมากับเปลือกหอย เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด และผึ่งแดดให้แห้ง ทำการบดเปลือกหอยด้วยครกหิน ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh จะได้ตัวอย่างเปลือกหอยเชอรี่ที่มีสีขาว ดังภาพที่ 4.1

ภาพที่ 4.1 เปลือกหอยเชอรี่บดละเอียดมีลักษณะเป็นผงสีขาวขนาด 100 และ 400 mesh

การวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีและการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate; $CaCO_3$(CC)) ของเปลือกหอยเชอรี่ ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray fluorescence; XRF) พบว่าเปลือกหอยเชอรี่มีแคลเซียม (Ca) เป็นองค์ประกอบ 44.00 เปอร์เซ็นต์ และมีแมกนีเซียม (Mg) ฟอสฟอรัส (P) กำมะถัน (S) ซิลิกา (Si) เหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) และโพแทสเซียม (K) 0.99, 0.74, 0.37, 0.26, 0.25, 0.22 และ 0.17 % ตามลำดับ จากความบริสุทธิ์ที่เตรียมได้ 99.15 % (ตารางที่ 4.1)

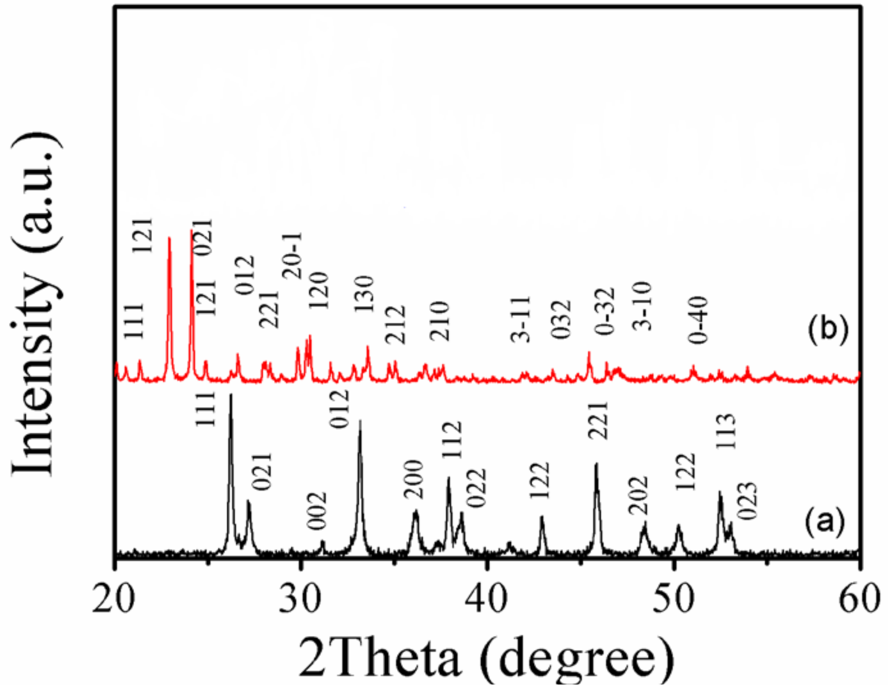
การเตรียมสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต โดยใช้เปลือกหอยเชอรี่ขนาด 100 mesh และความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก 70 % ตามวิธีการของ Boonchom (2009) แล้วนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีและการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้ พบว่ามีปริมาณฟอสฟอรัส 24.40 % และไม่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก นอกจากนี้ยังมีแคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม ซิลิกา กำมะถัน ทองแดง และเหล็ก 17.00, 0.54, 0.31, 0.27, 0.11, 0.09 และ 0.08 % ตามลำดับ จากความบริสุทธิ์ที่เตรียมได้ 98.54 % (ตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมี และความบริสุทธิ์ของแคลเซียมคาร์บอเนตและสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence; XRF) และเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของ $CaCO_3$ (CC) และ $Ca(H_2PO_4)_2{\cdot}H_2O$ (MCPM)

Elemental content (%)	Samples	
	$CaCO_3$	$Ca(H_2PO_4)_2{\cdot}H_2O$
Ca	44.00	17.00
P	0.74	24.40
O	53.00	57.20
Mg	0.99	0.31
Si	0.26	0.27
K	0.17	0.54
Cu	0.22	0.09
S	0.37	0.11
Fe	0.25	0.08
Purity (%)	98.75	99.20
Yield (%)	99.15	98.54

4.1.2 โครงสร้างผลึกของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

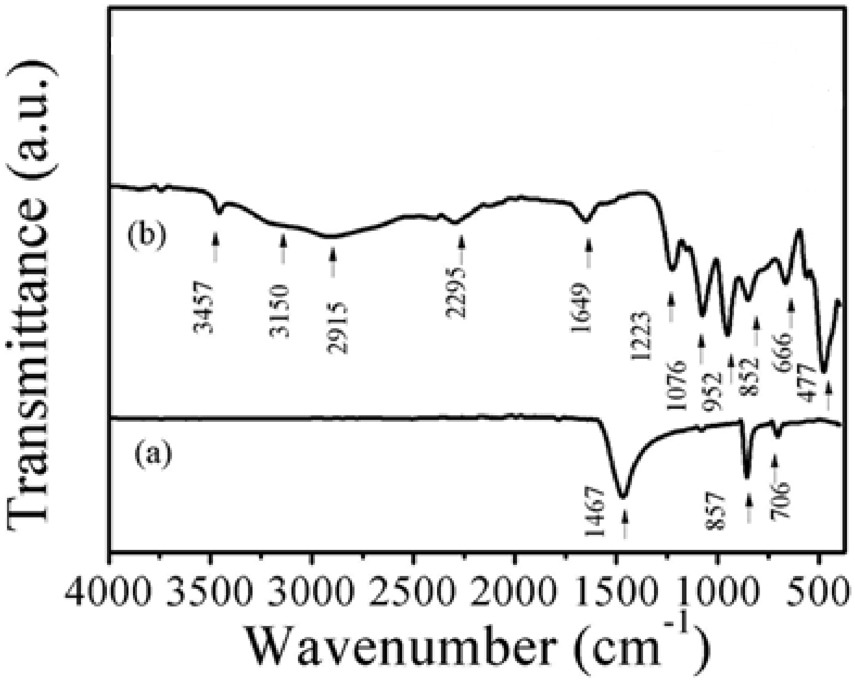
การศึกษาองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างทั้งของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และเชิงปริมาณ (quantitative) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ของแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยเชอรี่ และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่เตรียมได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.2 โดยจากกราฟที่ได้ของค่าความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ที่วัดได้ (intensity) กับมุมที่ทำการวัด (2-theta) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานของสถาบัน ICDD (International Center for Diffraction Data) ในระบบฐานข้อมูล the Powder Diffraction File™ (PDF™) พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ของแคลเซียมคาร์บอเนต ที่เตรียมได้ ปรากฏพีคที่ $2\theta = 26.16°$ บนระนาบ 111 ซึ่งเทียบได้กับข้อมูลมาตรฐานของฐานข้อมูล PDF No. 75-2230 สำหรับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่เตรียมได้ ปรากฏพีคที่มีลักษณะแหลมอย่างชัดเจน 2 ตำแหน่งคือที่ $2\theta = 23.71°$ และ $25.59°$ บนระนาบ 121 และ 021 ตามลำดับ ซึ่งเทียบได้กับข้อมูลมาตรฐานของฐานข้อมูล PDF No. 76-1822



ภาพที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ของผง $CaCO_3$ (CC) และ $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ (MCPM) ที่เตรียมได้

4.1.3 โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

การศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุลของสาร โดยการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) เพื่อหาโครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุลของสาร ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ พบว่า ผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CC) จากเปลือกหอยเชอรี่ และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้ โดยอาศัยหลักการของการดูดกลืนคลื่นรังสีช่วงอินฟราเรด (infrared) พันธะเคมีในโมเลกุลของสารจะดูดกลืนพลังงานในค่าความยาวคลื่นหนึ่ง แล้วนำข้อมูลดังกล่าวมาประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ โดยการใช้สมการเชิงอนุพันธ์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform) ซึ่งจะคำนวณพลังงานของแต่ละความยาวคลื่นและแปรผลออกมาเป็นสเปกตรัม สารแต่ละชนิดซึ่งมีลักษณะสเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะ ทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของสารตัวอย่างได้โดยเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่มีอยู่ในฐานข้อมูล ผลการตรวจวิเคราะห์ผงแคลเซียมคาร์บอเนต และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่เตรียมได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.3 จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงรังสีอินฟราเรดของแคลเซียมคาร์บอเนต พบพีคการสั่นของไอออนลบของหมู่คาร์บอเนต (CO_3^{2-})ในบล็อกยูนิตของโครงสร้างแคลเซียมคาร์บอเนต มีพีคการดูดกลืนของ CO_3^{2-} ที่ 1467 cm^{-1} ที่เกิดจากพันธะระหว่าง C-O เป็นการสั่นแบบยืด (stretching) การสั่นของพีคที่ 1081, 857 และ 706 cm^{-1} เกิดจากพันธะระหว่าง C-O พีคของการสั่นแบบงอ (bending) ที่อยู่ต่างระนาบ (out plane) และระนาบเดียวกัน (in plane) ของไอออนลบของ CO_3^{2-} ตามลำดับ จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงรังสีอินฟราเรดของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่เตรียมได้ พบว่า มีการสั่นของไอออนลบของ $H_2PO_4^-$ และโมเลกุลของน้ำเป็นพื้นฐาน บริเวณที่มีแบนด์ของการสั่นแบบยืดที่แข็งแรงของพันธะ P-O ที่ 1150-950 cm^{-1} บริเวณที่มีการสั่นแบบงอของพันธะ O-P-O ที่ 450-600 cm^{-1} ซึ่งพีคที่ปรากฏอยู่ระหว่างนี้จะแสดงถึงหมู่ฟังก์ชั่นฟอสเฟต (PO_4^{3-}) บริเวณที่มีการสั่นแบบงอของ couple band ของพันธะระหว่าง P-O-H ที่อยู่ในระนาบเดียวกัน (*A2*) และแบบต่างระนาบ (*A1*) ที่ 1250 และ 790 cm^{-1} ตามลำดับ บริเวณที่มีการสั่นแบบยืดของพันธะ O-H ของไอออนลบ $H_2PO_4^-$ ปรากฏลักษณะของ A, B, C trio bands ที่ 3130-3180 cm^{-1} (A band), 2380-2440 cm^{-1} (B band) และ 1670-1800 cm^{-1} (C band) ซึ่งจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี (FT-IR) สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่เตรียมได้ ด้วยวิธีการอย่างง่าย อยู่ในรูปของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรท (monocalcium phosphate monohydrate; $Ca(H_2PO_4)_2{\bullet}H_2O$ (MCPM))



ภาพที่ 4.3 ผลการวัดสเปกตรัม FT-IR ของ (a) ผง $CaCO_3$ (CC) และ (b) $Ca(H_2PO_4)_2{\cdot}H_2O$ (MCPM) ที่เตรียมได้

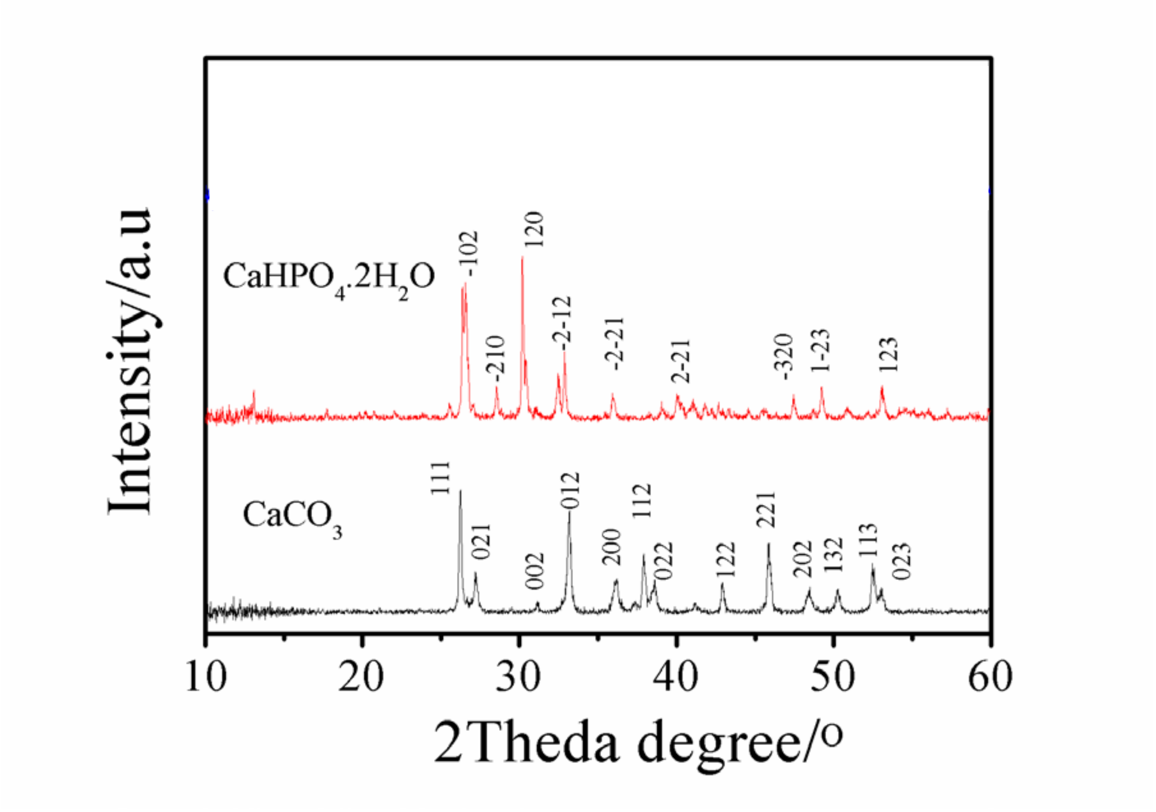
4.1.4 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

การศึกษาสัณฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนต (CC) และโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรท (MCPM) ที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดให้มีขนาด 100 mesh มีลักษณะเป็นผลึกที่เรียกว่า lumber-like crystals ซึ่งมีลักษณะเหมือนเปลือกไม้ที่มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ โดยส่วนมากเป็นขนาดเล็กจำนวนมาก และมีขนาดใหญ่ปะปนกันอยู่ (ภาพที่ 4.6 (a)) และภาพที่ 4.6 (b) เป็นลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรท มีลักษณะเป็นผลึกที่เชื่อมต่อรวมกัน มีรูปร่างเป็นแผ่นแบนคล้ายจานที่มีลักษณะสัณฐานไม่แน่นอน โดยมีขนาดที่แตกต่างกันในช่วง 0.40-2.00 µm

4.2 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีอนุภาคขนาดเล็ก

4.2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

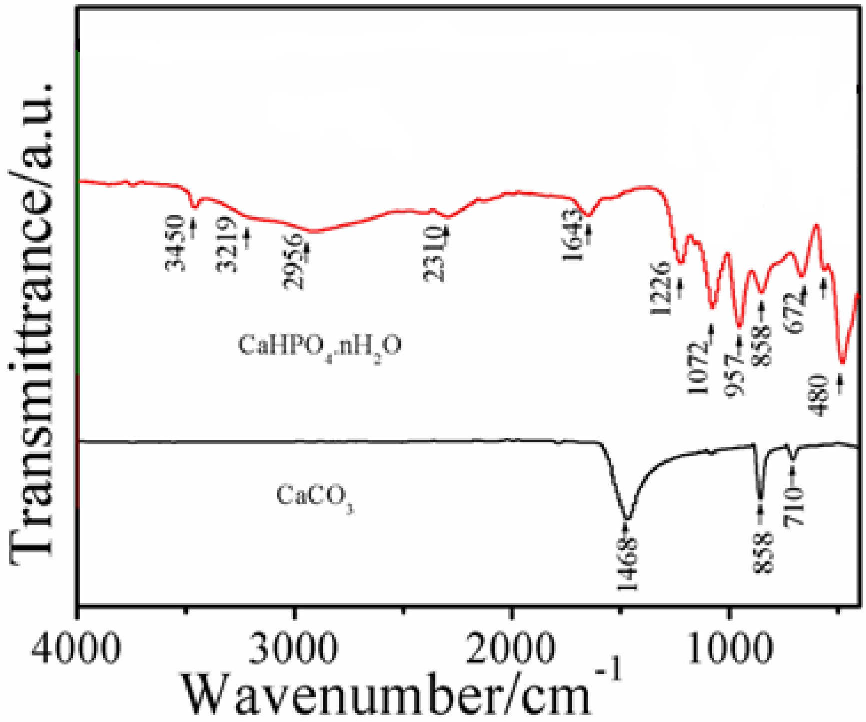
การเตรียมสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต โดยใช้เปลือกหอยเชอรี่ขนาด 400 mesh และความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริก 50 % ตามวิธีการของ Boonchom (2009) แล้วนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างผลึกของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffraction (XRD) พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ของผง $CaCO_3$ และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่เตรียมได้ เมื่อนำค่าความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ที่วัดได้ (intensity) กับมุมที่ทำการวัด (2-theta) มาเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานของสถาบัน ICDD ในระบบฐานข้อมูล PDF™ พบว่า $CaCO_3$ และ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ สอดคล้องกับข้อมูลในระบบฐานข้อมูลของ PDF™ คือ PDF No. 75-2230 และ PDF No. 70-0360 ตามลำดับ โดย $CaCO_3$ ปรากฏพีคหลักแสดงเอกลักษณ์สำคัญที่ $2\theta = 26.16°$ บนระนาบ 111 และ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ ปรากฏพีคหลักแสดงเอกลักษณ์สำคัญที่ $2\theta = 26.55°$ บนระนาบ –102, 28.49° บนระนาบ -210, 30.15° บนระนาบ 120 และ33.05° บนระนาบ -2-12 ดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ของผง $CaCO_3$ และ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ ที่เตรียมได้

4.2.2 โครงสร้างทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

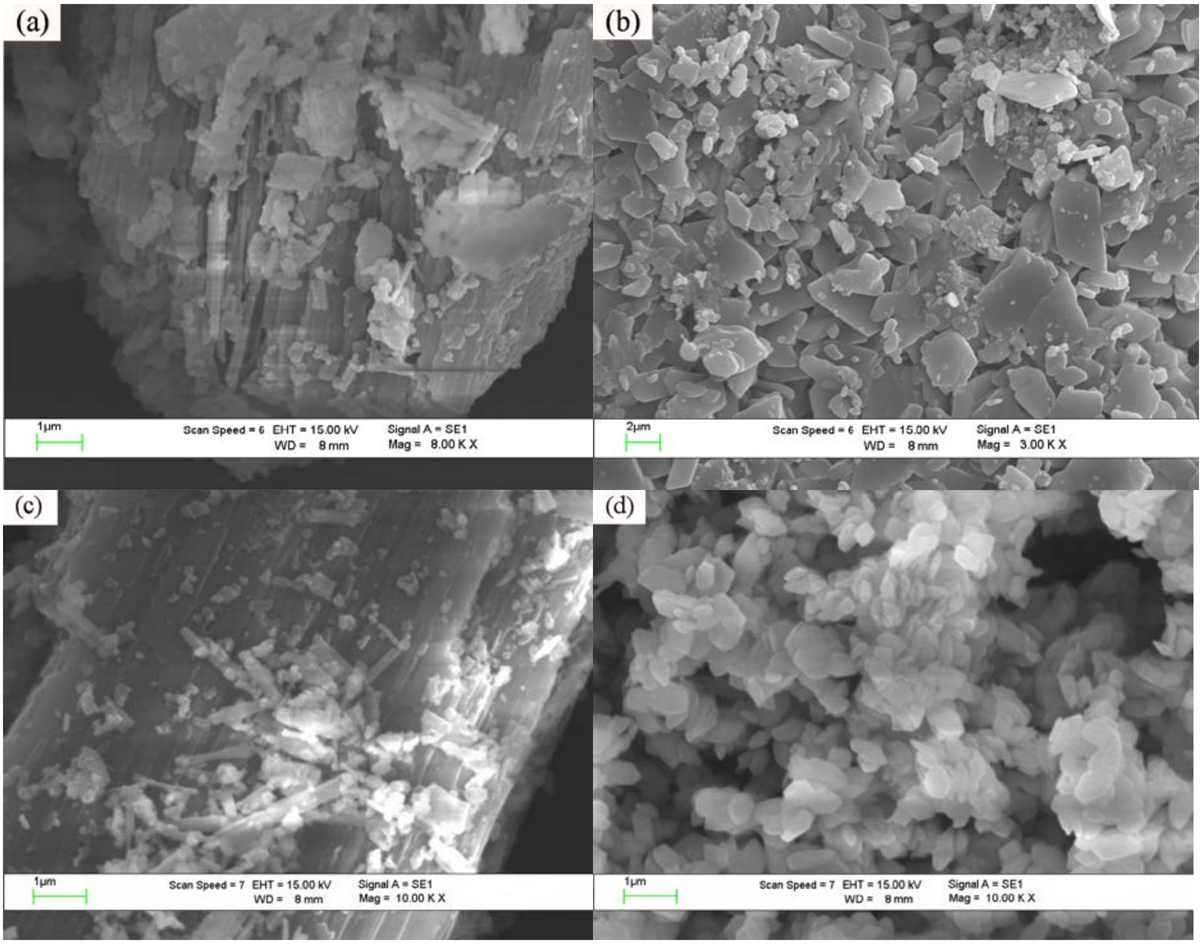
การศึกษาด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) ผลการศึกษาผงของ $CaCO_3$ ที่ได้จากเปลือกหอยเชอรี่ และ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ ที่เตรียมได้ มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าสเปกตรัมที่ได้ มีลักษณะของสเปกตรัมที่ได้มีความคล้ายกันอย่างมากเมื่อเทียบกับการสั่นที่เกิดขึ้นของไอออนลบของ CO_3^{2-}, HPO_4^{2-} และโมเลกุลของน้ำ ซึ่งผลที่ได้ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับสเปกตรัมของ $CaCO_3$ และ $CaHPO_4{\cdot}2H_2O$ ผลการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของ $CaCO_3$ พบพีคของการสั่นแบบยืดปรากฏที่ 1468 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันไอออนลบของคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ที่เกิดจากพันธะระหว่าง C-O และพีคของหมู่ฟังก์ชัน CO_3^{2-} ของโครงสร้างผลึกแบบ Aragonite ($CaCO_3$) ปรากฏที่ 858 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดโดยสมมาตร (symmetric stretching mode) และที่พีค 710 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบงอที่อยู่ต่างระนาบ (out plane) และระนาบเดียวกัน (in plane) ของไอออนลบของ CO_3^{2-} ในส่วนของสารประกอบ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ พบลักษณะการสั่นของไอออนลบของ HPO_4^{2-} ทั้งการสั่นแบบยืดโดยสมมาตรและไม่สมมาตรของหมู่ฟังก์ชัน PO_4^{3-} ปรากฏที่ 1072, 957, 672 523 และ 480 cm^{-1} พบการสั่นแบบ Weak shoulder ที่ประมาณ 1200-1400 cm^{-1} แสดงว่าเป็นลักษณะที่มีการปรากฏของหมู่ฟังก์ชัน HPO_4^{2-} และนอกจากนี้ยังพบว่าหมู่ฟังก์ชัน HPO_4^{2-} มีการสั่นในระนาบเดียวกัน (in plane) และต่างระนาบ (out plane) ที่ 858 และ 1226 cm^{-1} ในขณะที่รูปแบบการสั่นของโมเลกุลของน้ำมีการสั่นแบบยืดโดยไม่สมมาตร โดยสมมาตร และการสั่นแบบงอสมมาตรเกิดขึ้นทั่วไปในช่วง 3600-3300, 3300-3000 และ 1630-1660 cm^{-1} ตามลำดับ และพบการสั่นที่ได้จากตัวอย่างที่เตรียมได้พบที่ 3450, 3219 และ 1643 cm^{-1} ในสเปกตรัม FT-IR ของ $CaHPO_4.1.9H_2O$ ที่เตรียมได้ตามลำดับ (ภาพที่ 4.5)



ภาพที่ 4.5 ผลการวัดสเปกตรัม FT-IR ของผง $CaCO_3$และ $CaHPO_4 \cdot 1.9H_2O$ ที่เตรียมได้

4.2.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

การศึกษาสัณฐานวิทยาของผง $CaCO_3$ ที่ได้จากการบดเปลือกหอยเชอรี่ และ $CaHPO_4 \cdot 1.9H_2O$ ที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง $CaCO_3$ และ $CaHPO_4 \cdot 1.9H_2O$ มีความแตกต่างกัน สำหรับอนุภาคของผง $CaCO_3$ ที่ได้จากการบดเปลือกหอยเชอรี่ มีลักษณะรูปร่างเป็น wooden fiber-like มีผิวหน้าแข็ง และขรุขระ และมีการเกาะรวมตัว (agglomeration) กันบนผิวสัมผัสซึ่งมีลักษณะรูปร่างและขนาดที่ไม่แน่นอน (ภาพที่ 4.6 (c)) ส่วนอนุภาคของ $CaHPO_4 \cdot 1.9H_2O$ มีลักษณะรูปร่างเป็น grainy rice-like และมีการเกาะรวมตัวทั้งที่มีขนาดใหญ่และขนาดเล็ก (ภาพที่ 4.6 (d))



ภาพที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของ (a) แคลเซียมคาร์บอเนต (CC) และ (b) โมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรท (MCPM) ที่เตรียมได้จากเปลือกหอยเชอรี่ 100 mesh (c) ผง $CaCO_3$ และ (b) $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ ที่เตรียมได้จากเปลือกหอยเชอรี่ 400 mesh

4.2.4 สมบัติทางความร้อนของเปลือกหอยเชอรี่และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน หรือ thermogravimetric analysis (TGA) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และไดแคลเซียมฟอสเฟตไฮเดรท ($CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$) ที่เตรียมได้ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยใช้การวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวและความละเอียดสูง พบว่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ (TG curve) ในช่วงอุณหภูมิ 100-775 ^{o}C มีการสูญเสียน้ำหนักของ $CaCO_3$ และ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$) ที่เตรียมได้ ต่อผลน้ำหนักของสารทั้งสองดังกล่าวเป็น 55.02% และ 75.53% ตามลำดับ ในการศึกษาปฏิกิริยาที่ใช้ความร้อนในการทำให้สารทั้งสองสลายตัว (thermal decomposition) ที่เกิดขึ้นในกรณีของ $CaCO_3$ พบว่า ปฏิกิริยาการสลายตัวเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน คือขั้นที่ 1

ที่อุณหภูมิ 200-650 ^{o}C (6.02%) และขั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิ 650-775 ^{o}C (49.00%) และใน $CaHPO_4·1.9H_2O$ ที่เตรียมได้ พบว่าปฏิกิริยาการสลายตัวเกิดขึ้น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นที่ 1 ที่อุณหภูมิ 100-200 ^{o}C (5.29%, 0.61 โมลของน้ำ) ขั้นที่ 2 ที่อุณหภูมิ 200-500 ^{o}C (6.45%, 0.74 โมลของน้ำ) และขั้นที่ 3 ที่อุณหภูมิ 500-775 ^{o}C (12.75%, 1.46 โมลของน้ำ) ดังแสดงในภาพที่ 4.7 สำหรับการสูญเสียมวลทั้งหมด (total mass losses) ของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และไดแคลเซียมฟอสเฟตไฮเตรท ($CaHPO_4·1.9H_2O$) ที่เตรียมได้ มีค่าเป็น 44.98% และ 24.47% ตามลำดับ และการเปลี่ยนแปลงความร้อน (Thermal transformation) ที่เกิดขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 4.1-4.4

$$CaCO_3(s) \longrightarrow CaO(s) + CO_2(g) \quad (4.1)$$

$$CaHPO_4.1.9H_2O(s) \longrightarrow CaHPO_4.1.29H_2O(s) + 0.61H_2O(g) \quad (4.2)$$

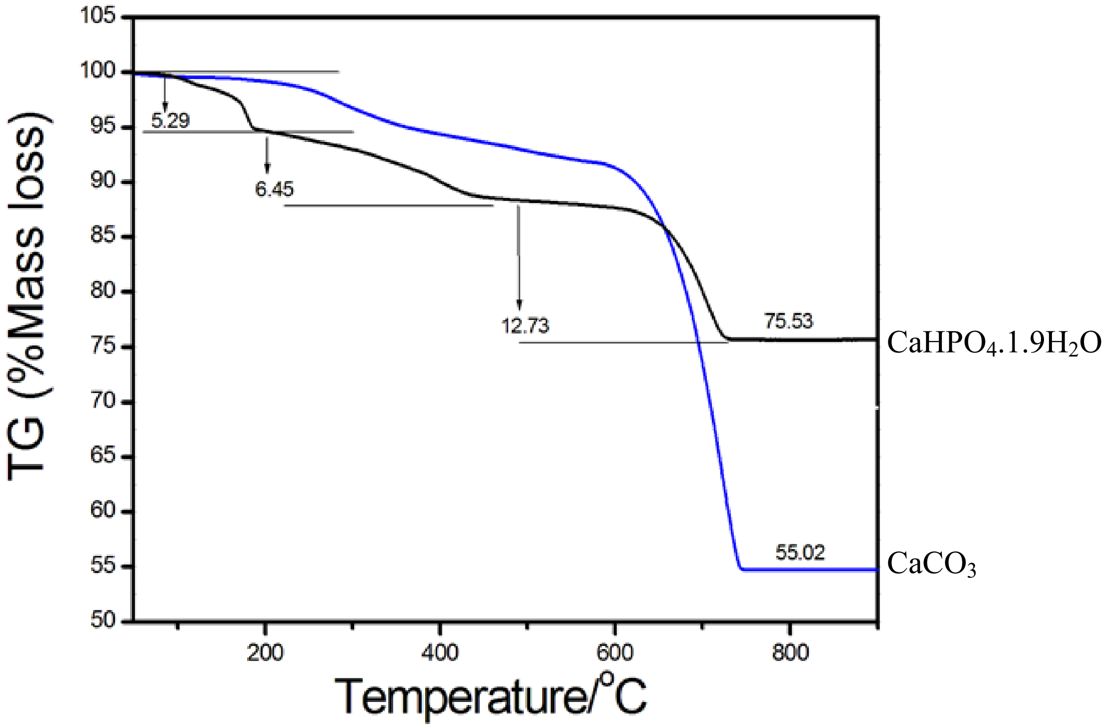
$$CaHPO_4.1.29H_2O(s) \longrightarrow CaHPO_4.0.56H_2O(s) + 0.74H_2O(g) \quad (4.3)$$

$$CaHPO_4.0.56H_2O \longrightarrow 1/2Ca_2P_2O_7 + 1.46H_2O(g) \quad (4.4)$$

จากปฏิกิริยาที่ใช้ความร้อน (thermal data) ที่ได้ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าสภาวะของอุณหภูมิ (temperature condition) ที่สูงกว่า 750 ^{o}C สามารถใช้ในการสังเคราะห์โพลีหรือไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_2P_2O_7$, $Ca_3(PO_4)_2$) โดยผ่านปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (solid state reaction) ของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และไดแคลเซียมฟอสเฟตไฮเตรท ($CaHPO_4·1.9H_2O$) ที่เตรียมได้ เมื่อใช้สภาวะอุณหภูมิที่ 800 ^{o}C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง

4.2.5 การละลายของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่

การทดสอบการละลายของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ พบว่าแคลเซียมฟอสเฟตที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการอย่างง่ายสารประกอบอยู่ในรูป $Ca(H_2PO_4)_2•H_2O$ มีร้อยละของการละลายได้จากน้อยไปมาก คือ น้ำ, 1 N ammonium citrate และ 2% citric acid ตามลำดับ และพบว่าการละลายได้ของ $Ca(H_2PO_4)_2•H_2O$ ใกล้เคียงกันในทุกตัวทำละลาย โดยละลายได้มากสุด คือ ร้อยละ 91.42 ในน้ำยา 2% citric acid และแคลเซียมฟอสเฟตที่ได้จากการสังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีอนุภาคขนาดเล็กสารประกอบอยู่ในรูป $CaHPO_4·1.9H_2O$ การละลายได้ของสารประกอบ $CaHPO_4·1.9H_2O$ จะแตกต่างกันในแต่ละตัวทำละลาย โดยละลายได้สูงสุด คือ ร้อยละ 74.02 ในน้ำยา 2% Citric acid เช่นเดียวกันกับ $Ca(H_2PO_4)_2•H_2O$ และเมื่อนำสารละลายที่ได้ไปหาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด พบว่า $Ca(H_2PO_4)_2•H_2O$ มีปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 20.91% หรือเทียบเป็น P_2O_5 เท่ากับ 45.90% ส่วน $CaHPO_4·1.9H_2O$ มีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดมากที่สุดเท่ากับ 12.36% (28.32% P_2O_5) ในน้ำยา 2% citric acid เช่นเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ (TG curve) ของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และไดแคลเซียมฟอสเฟตไฮเดรท ($CaHPO_4 \cdot 1.9H_2O$)

ตารางที่ 4.2 ร้อยละของการละลายและปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่

แคลเซียมฟอสเฟต	ตัวทำละลาย		
	น้ำ	1 N ammonium citrate	2% citric acid
$Ca(H_2PO_4)_2 \bullet H_2O$	89.75	90.47	91.42
$CaHPO_4 \cdot 1.9H_2O$	20.69	39.17	74.02
	total phosphorus (%)		
$Ca(H_2PO_4)_2 \bullet H_2O$	20.03	20.35	20.91
$CaHPO_4 \cdot 1.9H_2O$	3.24	6.41	12.36

4.3 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีในการปลูกอ้อย

4.3.1 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา)

4.3.1.1 สมบัติของดินในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา) ก่อนการใส่ปุ๋ยของการทดลอง

การศึกษาตัวอย่างดินก่อนการทดลองใส่ปุ๋ยต่างชนิด และอายุของอ้อยในพื้นที่ลุ่มที่ปลูกอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 พบว่า ความเป็นกรดด่างของดิน (1:5) ของพื้นที่นา มีค่าอยู่ระหว่าง 5.23-5.92 ซึ่งเป็นดินกรดจัด มีค่าเฉลี่ยของความเป็นกรดด่างของดินไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (1:5) มีค่าตั้งแต่ 67 μS/cm ถึง 131 μS/cm เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างพื้นที่ปลูกอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 และบริเวณที่ให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยพบความความแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) แต่ไม่มีอิทธิพลร่วมกันระหว่าง 2 ปัจจัย (ตารางที่ 4.3) ปริมาณร้อยละของอินทรียวัตถุในดิน (OM) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.37-1.85 ซึ่งเป็นดินที่มีอินทรียวัตถุในระดับที่เหมาะสมในการปลูกอ้อย และมีค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ในระหว่างพื้นที่อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 เช่นเดียวกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ก็ไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 21.54-40.15 mg/kg ซึ่งมีปริมาณที่อยู่ในระดับสูง (ตารางที่ 4.4) ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบความแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) ในพื้นที่ปลูกอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 แต่ไม่มีอิทธิพลร่วมกันระหว่าง 2 ปัจจัย โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 41.56-80.48 mg/kg ซึ่งอยู่เกณฑ์ที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมในการปลูกอ้อย ส่วนแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) ทั้งในพื้นที่ปลูกอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 และพื้นที่ที่ให้ปุ๋ยต่างชนิดกันและไม่มีอิทธิพลร่วมกันระหว่างทั้ง 2 ปัจจัย โดยมีค่าเฉลี่ยของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ เท่ากับ 346.12 และ 45.86 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองธาตุอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม (215-487 และ 29-73 mg/kg ตามลำดับ) ในการปลูกอ้อย (กรมวิชาการเกษตร, 2544) (ตารางที่ 4.5)

4.3.1.2 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อสมบัติดินหลังเก็บเกี่ยวอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ลุ่ม

1) ความเป็นกรดด่างของดิน

ผลการทดลองให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปปุ๋ยเคมี (ปุ๋ยเคมี) สำเร็จรูปมาตรฐานและปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ (ปุ๋ยเปลือกหอย) ในการปลูกอ้อยตอต่อความเป็นกรดด่างของดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย อายุ 12 เดือน พบว่า ความเป็นกรดด่างของดินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ในอายุของอ้อยตอ โดยในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มี pH เฉลี่ย เท่ากับ 6.21 และ 5.96 ตามลำดับ แต่พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ระหว่างชนิดของปุ๋ยที่

ให้กับอ้อย โดย pH ของดินที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยมีความเป็นกรดด่างสูงกว่าการให้ปุ๋ยเคมีกับอ้อยตอ คือ 6.24 และ 5.93 ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย (ตารางที่ 4.3)

2) ค่าการนำไฟฟ้าของดิน

ค่าการนำไฟฟ้าของดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย อายุ 12 เดือน พบว่า ค่าเฉลี่ยการนำไฟฟ้าของดินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มี EC เฉลี่ย เท่ากับ 175.63 และ 204.13 μS/cm ตามลำดับ การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 204.63 และ 175.13 μS/cm ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุตออ้อยและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย (ตารางที่ 4.3)

ตารางที่ 4.3 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อ pH และ EC ของดินก่อนและหลังการทดลองในพื้นที่ลุ่ม

ปัจจัย		pH		EC (μS/cm)	
		ก่อนใส่ปุ๋ย	หลังใส่ปุ๋ย	ก่อนใส่ปุ๋ย	หลังใส่ปุ๋ย
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 2	5.59	6.21	104.38^{a}	175.63
(A)	อ้อยตอ 3	5.56	5.96	83.75^{b}	204.13
% CV (A)		1.04	2.82	15.50	10.61
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	5.45	5.93^{b}	85.25^{b}	204.63
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	5.59	6.24^{a}	102.88^{a}	175.13
% CV (B)		1.81	3.66	13.25	10.99
F-test	A x B	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ ตัวเลขที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)
ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

3) ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

ปริมาณอินทรียวัตถุในดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย อายุ 12 เดือน พบว่า ปริมาณอินทรียวัตถุในดินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีอินทรียวัตถุในดินเฉลี่ย เท่ากับ ร้อยละ 1.76 และ 1.97 ตามลำดับ การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ ร้อยละ 1.87 และ 1.86 ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย (ตารางที่ 4.4)

4) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย อายุ 12 เดือน พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (available P) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในอายุของอ้อยตอ โดยในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มี available P เฉลี่ย เท่ากับ 57.40 และ 57.75 mg/kg ตามลำดับ แต่พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05) ระหว่างชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดย pH ของดินที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยมี available P สูงกว่าการให้ปุ๋ยเคมีกับอ้อยตอ คือ 62.07 และ 53.07 mg/kg ตามลำดับ และยังพบว่าอายุของอ้อยตอมีปฏิสัมพันธ์ร่วมกับชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยด้วย โดย available P ในดินที่ปลูกอ้อยตอ 3 และให้ปุ๋ยเปลือกหอยมีปริมาณสูงสุด ส่วนในอ้อยตอ 3 ที่ให้ปุ๋ยเคมีมีค่าน้อยที่สุด (ตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณอินทรียวัตถุ และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของดินก่อนและหลังการทดลองในพื้นที่ลุ่ม

ปัจจัย		OM (%)		available P (mg/kg)	
		ก่อนใส่ปุ๋ย	หลังใส่ปุ๋ย	ก่อนใส่ปุ๋ย	หลังใส่ปุ๋ย
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 2	1.66	1.76	28.19	57.40
(A)	อ้อยตอ 3	1.57	1.97	31.17	57.75
% CV (A)		3.84	8.07	7.10	0.44
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	1.61	1.87	28.22	53.07^{b}
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	1.62	1.86	31.15	62.07^{a}
% CV (B)		0.44	0.38	6.97	11.05
F-test	A x B	ns	ns	ns	*

หมายเหตุ ตัวเลขที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

5) ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย อายุ 12 เดือน พบว่า ปริมาณ exchangeable K ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีปริมาณ exchangeable K ในดินเฉลี่ย เท่ากับ 61.13 และ 54.68 mg/kg ตามลำดับ การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 58.20 และ 57.60

mg/kg ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย (ตารางที่ 4.5)

6) ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย อายุ 12 เดือน พบว่า ปริมาณ exchangeable Ca ในดินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในอายุของอ้อยตอ โดยในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มี exchangeable Ca ในดินเฉลี่ย เท่ากับ 365.92 และ 394.84 mg/kg ตามลำดับ แต่พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05) ระหว่างชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยปริมาณ exchangeable Ca ในดินที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยมี exchangeable Ca สูงกว่าการให้ปุ๋ยเคมีกับอ้อยตอ คือ เท่ากับ 406.67 และ 354.09 mg/kg ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย (ตารางที่ 4.5)

7) ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย อายุ 12 เดือน พบว่า ปริมาณ exchangeable Mg ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีปริมาณ exchangeable Mg ในดินเฉลี่ย เท่ากับ 48.99 และ 46.38 mg/kg ตามลำดับ การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 45.32 และ 50.04 mg/kg ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย (ตารางที่ 4.5)

ตารางที่ 4.5 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อโพแทสเซียม แคลเซียม และ แมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินก่อนและหลังการทดลองในพื้นที่ลุ่ม

ปัจจัย		exchangeable K (mg/kg)		exchangeable Ca (mg/kg)		exchangeable Mg (mg/kg)	
		ก่อนใส่ปุ๋ย	หลังใส่ปุ๋ย	ก่อนใส่ปุ๋ย	หลังใส่ปุ๋ย	ก่อนใส่ปุ๋ย	หลังใส่ปุ๋ย
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 2	65.70[a]	61.13	330.22	365.92	46.46	48.99
(A)	อ้อยตอ 3	53.04[b]	54.68	362.02	394.84	45.26	46.38
% CV (A)		15.08	7.88	6.50	5.38	1.85	3.86
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	60.58	58.20	346.11	354.09[b]	46.06	45.32
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	58.15	57.60	346.13	406.67[a]	45.66	50.04
% CV (B)		2.89	0.73	0.00	9.78	0.62	7.00
F-test	A x B	ns	ns	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ ตัวเลขที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

4.3.1.3 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตของอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ลุ่ม

1) ความสูงต้นอ้อย

ผลการทดลองให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปปุ๋ยเคมีและ ปุ๋ยเปลือกหอยที่มีต่อการเจริญเติบโตของอ้อยตอ พบว่าความสูงของต้นอ้อยที่อายุ 4 เดือน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยในอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีความสูงเฉลี่ย เท่ากับ 1.24 และ 1.17 m ตามลำดับ การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.15 และ 1.26 m ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยเมื่ออายุอ้อย 4 เดือน และเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P< 0.05$) ระหว่างอายุของอ้อยตอ 2 และตอ 3 โดยความสูงของต้นอ้อยตอ 2 มีความสูงมากกว่าอ้อยตอ 3 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.79 และ 2.50 m ตามลำดับ ส่วนชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยทำให้ความสูงของต้นอ้อยเฉลี่ยเท่ากับ 2.69 และ 2.60 m ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย ต่อความสูงของต้นอ้อยที่อายุ 8 เดือน (ตารางที่ 4.6)

2) เส้นผ่าศูนย์กลางของลำอ้อย

เส้นผ่าศูนย์กลางของลำอ้อยที่อายุ 4 และ 8 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยเมื่ออายุอ้อย 4 เดือน อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีเส้นผ่าศูนย์กลางของลำเฉลี่ย เท่ากับ 30.51 และ 29.87 mm ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 30.51 และ 29.87 mm ตามลำดับ และเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีเส้นผ่าศูนย์กลางของลำเฉลี่ย เท่ากับ 25.52 และ 26.29 mm ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 26.31 และ 25.50 mm ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยทั้งเมื่ออายุอ้อย 4 และ 8 เดือน (ตารางที่ 4.6)

3) จำนวนต้น

จำนวนต้นต่อไร่ของอ้อยตอที่อายุ 4 และ 8 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยเมื่ออายุอ้อย 4 เดือน อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีจำนวนต้นต่อไร่เฉลี่ย เท่ากับ 11,019.63 และ 11,369.57 ต้น/ไร่ ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 11,104.21 และ 11,284.99 ต้น/ไร่ ตามลำดับ และเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีจำนวนต้นต่อไร่เฉลี่ย เท่ากับ 10,810.00 และ 11,246.51 ต้น/ไร่ ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 10,979.21 และ 11,077.30 ต้น/ไร่ ตามลำดับ และไม่

พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยทั้งเมื่ออายุอ้อย 4 และ 8 เดือน (ตารางที่ 4.7)

ตารางที่ 4.6 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อความสูงต้นและเส้นผ่าศูนย์กลางของลำอ้อยหลังจากการให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ลุ่ม

ปัจจัย		ความสูงต้นเฉลี่ย (m)		เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	
		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)	
		4	8	4	8
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 2	1.24	2.79[a]	30.51	25.52
(A)	อ้อยตอ 3	1.17	2.50[b]	29.87	26.29
% CV (A)		3.22	7.83	3.79	2.11
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	1.15	2.69	30.51	26.31
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	1.26	2.60	29.87	25.50
% CV (B)		6.76	2.41	1.50	2.21
F-test	A x B	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ ตัวเลขที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)
ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

4) ความเขียวใบ

ความเขียวของใบอ้อยที่วัดเป็นค่า SPAD value ที่อายุอ้อย 4 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยในอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีค่า SPAD value เฉลี่ย เท่ากับ 44.70 และ 45.68 ตามลำดับ การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย SPAD value เท่ากับ 44.70 และ 45.68 ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย และเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05) ระหว่างอายุของอ้อยตอ 2 และตอ 3 โดยค่าความเขียวของใบอ้อยของอ้อยตอ 2 มีความเขียวของใบอ้อยมากกว่าอ้อยตอ 3 ซึ่งมีค่า SPAD value เฉลี่ยเท่ากับ 44.37 และ 40.35 ตามลำดับ ส่วนชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยทำให้ความเขียวของใบอ้อยเฉลี่ยเท่ากับ 41.00 และ 43.37 ตามลำดับ และพบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย ต่อความเขียวของใบอ้อยที่อายุ 8

เดือน โดยอ้อยตอ 2 ที่ให้ปุ๋ยเคมีมีค่าความเขียวมากที่สุด ส่วนในอ้อยตอ 3 ที่ให้ปุ๋ยเคมีมีความความเขียวน้อยที่สุด (ตารางที่ 4.7)

ตารางที่ 4.7 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อจำนวนต้นและความเขียวใบของอ้อยหลังจากการให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ลุ่ม

ปัจจัย		จำนวนต้นเฉลี่ย (ต้น/ไร่)		ความเขียวใบเฉลี่ย (SPAD Value)	
		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)	
		4	8	4	8
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 2	11,104.21	10,810.00	44.70	44.37[a]
(A)	อ้อยตอ 3	11,284.99	11,246.51	45.68	40.35[b]
% CV (A)		2.21	2.80	1.03	7.11
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	11,019.63	10,979.21	44.70	41.00
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	11,369.57	11,077.30	45.68	43.73
% CV (B)		1.14	0.63	1.52	4.13
F-test	A x B	ns	ns	ns	*

หมายเหตุ ตัวเลขที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

4.3.1.4 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณธาตุอาหารพืชในใบอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ลุ่ม

1) ไนโตรเจนทั้งหมดในใบอ้อย

ผลการทดลองให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปปุ๋ยเคมีและ ปุ๋ยเปลือกหอยที่มีต่อการสะสมของธาตุอาหารพืชในใบอ้อย พบว่าการสะสมไนโตรเจนทั้งหมดในใบอ้อยที่อายุ 4 เดือน พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05) ระหว่างอายุของอ้อยตอ 2 และตอ 3 โดยปริมาณ N ที่สะสมในใบอ้อยของอ้อยตอ 2 มีปริมาณมากกว่าอ้อยตอ 3 ซึ่งมีปริมาณ N เฉลี่ยเท่ากับ 1.93 และ 1.79 % ตามลำดับ ส่วนชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยทำให้มีปริมาณ N สะสมในใบอ้อยเฉลี่ยเท่ากันที่ 1.86 % และพบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยการให้ปุ๋ยเคมีกับอ้อยตอ 3 มีการสะสมไนโตรเจนต่ำกว่าแปลงที่เหลือทั้งหมด และเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยในอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีปริมาณ N

เฉลี่ยเท่ากับ 1.81 และ 1.72 % ตามลำดับ การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.71 และ 1.83 % ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย ต่อการสะสม N เมื่ออ้อย 8 เดือน (ตารางที่ 4.8)

2) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในใบอ้อย

ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในใบอ้อยตอที่อายุ 4 และ 8 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยเมื่ออายุอ้อย 4 เดือน อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีปริมาณ P สะสมในใบอ้อยเฉลี่ยเท่ากัน คือ 0.18 % และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.17 และ 0.19 % ตามลำดับ และเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีปริมาณการสะสม P เฉลี่ย เท่ากับ 0.20 และ 0.19 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 และ 0.20 % ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อการสะสมฟอสฟอรัสในใบทั้งเมื่ออายุอ้อย 4 และ 8 เดือน (ตารางที่ 4.8)

ตารางที่ 4.8 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมดของใบอ้อยหลังจากให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ลุ่ม

		ไนโตรเจน (%)		ฟอสฟอรัส (%)	
		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)	
ปัจจัย		4	8	4	8
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 2	1.93[a]	1.81	0.18	0.20
(A)	อ้อยตอ 3	1.79[b]	1.72	0.18	0.19
% CV (A)		5.52	3.51	3.45	4.56
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	1.86	1.71	0.17	0.19
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	1.86	1.83	0.19	0.20
% CV (B)		6.87	4.81	6.41	6.39
F-test	A x B	*	ns	ns	ns

หมายเหตุ ตัวเลขที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

3) ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในใบอ้อย

ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในใบอ้อยตอที่อายุ 4 และ 8 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยเมื่ออายุอ้อย 4 เดือน อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีปริมาณ K สะสมในใบอ้อยเฉลี่ยเท่ากับ 1.45 และ 1.42 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.46 และ 1.42 % ตามลำดับ และเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีปริมาณการสะสม K เฉลี่ย เท่ากับ 1.23 และ 1.22 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.30 และ 1.15 % ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อการสะสมโพแทสเซียมในใบทั้งเมื่ออายุอ้อย 4 และ 8 เดือน (ตารางที่ 4.9)

4) ปริมาณแคลเซียมทั้งหมดในใบอ้อย

การสะสมแคลเซียมทั้งหมดในใบอ้อยที่อายุ 4 เดือน ไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอ 2 และตอ 3 โดยปริมาณ Ca ที่สะสมในใบอ้อยของอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากัน คือ 0.17 % แต่ชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P< 0.05$) โดยการให้ปุ๋ยเปลือกหอยมีการสะสมของแคลเซียมในใบอ้อยสูงกว่าการให้ปุ๋ยเคมี คือ 0.22 และ 0.12 % ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย และเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน พบว่าการสะสมแคลเซียมในใบอ้อยเป็นเช่นเดียวกับอ้อยที่อายุ 4 เดือน คือ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอ โดยในอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีปริมาณ Ca เฉลี่ยเท่ากับ 0.12 และ 0.15 % ตามลำดับ ส่วนชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยกลับพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P< 0.05$) โดยการให้ปุ๋ยเปลือกหอยมีการสะสมของแคลเซียมในใบอ้อยสูงกว่าการให้ปุ๋ยเคมี คือ 0.17 และ 0.11 % ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย ต่อการสะสม Ca เมื่ออ้อย 8 เดือน (ตารางที่ 4.9)

5) ปริมาณแมกนีเซียมในใบอ้อย

ปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมดในใบอ้อยตอที่อายุ 4 และ 8 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยเมื่ออายุอ้อย 4 เดือน อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีปริมาณการสะสม Mg ในใบอ้อยเฉลี่ยเท่ากับ 1.59 และ 1.72 % และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.63 และ 1.67 % ตามลำดับ และเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีปริมาณการสะสม Mg เฉลี่ย เท่ากับ 1.86 และ 1.82 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.65 และ 2.03 % ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อการสะสมแมกนีเซียมในใบทั้งเมื่ออายุอ้อย 4 และ 8 เดือน (ตารางที่ 4.10)

ตารางที่ 4.9 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณโพแทสเซียมและแคลเซียมทั้งหมดของใบอ้อยหลังจากการให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ลุ่ม

		โพแทสเซียม(%)		แคลเซียม (%)	
		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)	
ปัจจัย		4	8	4	8
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 2	1.45	1.23	0.17	0.12
(A)	อ้อยตอ 3	1.42	1.22	0.17	0.15
% CV (A)		1.35	0.22	1.57	15.71
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	1.46	1.30	0.12[b]	0.11[b]
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	1.42	1.15	0.22[a]	0.17[a]
% CV (B)		2.21	8.31	41.23	31.43
F-test	A x B	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ ตัวเลขที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)
ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

ตารางที่ 4.10 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อแมกนีเซียม (%) ของใบอ้อยหลังจากให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ลุ่ม

		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)	
ปัจจัย		4	8
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 2	1.59	1.86
(A)	อ้อยตอ 3	1.72	1.82
% CV (A)		5.29	1.49
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	1.63	1.65
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	1.67	2.03
% CV (B)		1.76	14.44
F-test	A x B	ns	ns

หมายเหตุ ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

4.3.1.5 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตอ้อยในพื้นที่ลุ่ม

ผลการทดลองให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปปุ๋ยเคมีและ ปุ๋ยเปลือกหอยกับอ้อยตอที่ปลูกในพื้นที่ลุ่ม และเก็บเกี่ยวในเดือนกุมภาพันธ์ 2560 เมื่ออ้อยมีอายุ 12 เดือน พบว่าความยาวลำของอ้อยที่วัดจากโคน ซึ่งตัดชิดพื้นดินถึงจุดหักธรรมชาติ (natural break point) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05) ระหว่างอายุของอ้อยตอ 2 และตอ 3 โดยความยาวลำของอ้อยตอ 2 มีมากกว่าอ้อยตอ 3 โดยความยาวของลำอ้อยเฉลี่ยเท่ากับ 3.06 และ 2.83 m ตามลำดับ ส่วนชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยทำให้ความยาวลำของอ้อยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.96 และ 2.93 m ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อความยาวลำของอ้อยตอ (ตารางที่ 4.11)

เส้นผ่าศูนย์กลางลำของอ้อยที่วัดตรงโคน กึ่งกลาง และปลายของลำอ้อยแล้วนำมาเฉลี่ย มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05) ระหว่างอายุของอ้อยตอ 2 และตอ 3 โดยเส้นผ่าศูนย์กลางลำของอ้อยตอ 2 มีมากกว่าอ้อยตอ 3 โดยเส้นผ่าศูนย์กลางลำอ้อยเฉลี่ยเท่ากับ 29.78 และ 28.11 mm ตามลำดับ ส่วนชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.59 และ 29.30 mm ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อเส้นผ่าศูนย์กลางลำของอ้อยตอ (ตารางที่ 4.11)

น้ำหนักลำอ้อยที่ชั่งได้เมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตอ้อ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05) ระหว่างอายุของอ้อยตอ 2 และตอ 3 โดยน้ำหนักลำของอ้อยตอ 2 มีมากกว่าอ้อยตอ 3 โดยน้ำหนักลำอ้อยเฉลี่ยเท่ากับ 2.20 และ 1.79 kg/ลำ ตามลำดับ ส่วนชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.96 และ 2.02 kg/ลำ ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อน้ำหนักต่อลำของอ้อยตอ (ตารางที่ 4.11)

จำนวนลำอ้อยที่เก็บเกี่ยวได้ต่อไร่ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยจำนวนลำต่อไร่ของอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9,831.02 และ 10,600.27 ลำ/ไร่ ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีจำนวนลำต่อไร่เฉลี่ย เท่ากับ 10,323.34 และ 10,107.95 ลำ/ไร่ ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อจำนวนลำอ้อยที่เก็บเกี่ยวได้ของอ้อยตอ (ตารางที่ 4.11)

ตารางที่ 4.11 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตอ้อยจากการเก็บเกี่ยวที่อายุ 12 เดือนในพื้นที่ลุ่ม

ปัจจัย		ความยาวลำ (m)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	น้ำหนักลำ (kg/ลำ)	จำนวนลำ/ไร่ (ลำ/ไร่)
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 2	3.06[a]	29.78[a]	2.20[a]	9,831.02
(A)	อ้อยตอ 3	2.83[b]	28.11[b]	1.79[b]	10,600.27
% CV (A)		5.47	4.07	14.43	5.32
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	2.96	28.59	1.96	10,323.34
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	2.93	29.30	2.02	10,107.95
% CV (B)		0.67	1.73	2.24	1.49
F-test	A x B	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ ตัวเลขที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)
ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

น้ำหนักผลผลิตของอ้อยที่เก็บเกี่ยวได้ ก็พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05) ระหว่างอายุของอ้อยตอ 2 และตอ 3 โดยน้ำหนักของผลผลิตที่ได้ของอ้อยตอ 2 ได้น้ำหนักมากกว่าอ้อยตอ 3 โดยผลผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 21.21 และ 18.70 ตัน/ไร่ ตามลำดับ ส่วนชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 19.86 และ 20.05 ตัน/ไร่ ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อน้ำหนักสดของผลผลิตอ้อยตอ (ตารางที่ 4.12)

คุณภาพของอ้อยที่เกิดขึ้นจากการให้ปุ๋ยชนิดต่าง ๆ ในอ้อยตอ ที่เป็นองค์ประกอบของผลผลิตน้ำตาล ในรูปของ commercial cane sugar (CCS) ซึ่งคำนวณจากเปอร์เซ็นต์ของไฟเบอร์ (% fibre) บริกซ์ (% Brix) โพล (% pol) และความบริสุทธิ์ของน้ำอ้อย (% purity) และผลผลิตของน้ำตาลที่ได้จากการเก็บเกี่ยวอ้อยเมื่ออายุ 12 เดือน พบว่า CCS ของอ้อยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยปริมาณ CCS ของอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.21 และ 13.62 CCS ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยเฉลี่ย เท่ากับ 13.81 และ 14.03 CCS ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อคุณภาพอ้อย (CCS) ของอ้อยตอ (ตารางที่ 4.12)

ผลผลิตของน้ำตาลที่คำนวณได้จากน้ำนักผลผลิตและคุณภาพอ้อย (CCS) ที่เก็บเกี่ยวได้ ก็พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05) ระหว่างอายุของอ้อยตอ 2 และตอ 3 โดยผลผลิต

ของน้ำตาลที่ได้จากอ้อยตอ 2 มีมากกว่าที่ได้จากอ้อยตอ 3 เฉลี่ยเท่ากับ 3.02 และ 2.54 ตัน/ไร่ ตามลำดับ ส่วนชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีผลผลิตของน้ำตาลเฉลี่ยเท่ากับ 2.75 และ 2.82 ตัน/ไร่ ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อผลผลิตของน้ำตาลของอ้อยตอ (ตารางที่ 4.12)

ตารางที่ 4.12 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตอ้อยจากการเก็บเกี่ยวที่อายุ 12 เดือนในพื้นที่ลุ่ม

ปัจจัย		ผลผลิต (ตัน/ไร่)	CCS	ผลผลิตน้ำตาล (ตัน/ไร่)
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 2	21.21[a]	14.21	3.02[a]
(A)	อ้อยตอ 3	18.70[b]	13.62	2.54[b]
% CV (A)		8.88	3.01	12.08
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	19.86	13.81	2.75
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	20.05	14.03	2.82
% CV (B)		0.66	1.13	1.90
F-test	A x B	ns	ns	ns

หมายเหตุ ตัวเลขที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)
ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

4.3.1.6 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อองค์ประกอบคุณภาพผลผลิตของอ้อยในพื้นที่ลุ่ม

องค์ประกอบคุณภาพของผลผลิตอ้อย ประกอบด้วย เปอร์เซ็นต์ของไฟเบอร์ (% fibre) บริกซ์ (% Brix) โพล (% pol) และความบริสุทธิ์ของน้ำอ้อย (% purity) ซึ่งวัดได้จากอ้อยที่เก็บเกี่ยวเมื่ออายุ 12 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย ทั้ง 4 พารามิเตอร์ที่ศึกษา โดยเปอร์เซ็นต์ไฟเบอร์ของอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.05 และ 13.52 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยเฉลี่ย เท่ากับ 13.31 และ 13.26 % ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์บริกซ์ของอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21.88 และ 21.21 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยเฉลี่ย เท่ากับ 21.31 และ 21.78 % ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์โพลของอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.02 และ 18.37 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยเฉลี่ย เท่ากับ 18.52 และ 18.86 % ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของน้ำอ้อยของอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 86.91 และ 86.64 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยเฉลี่ย เท่ากับ

86.95 และ 86.60 % ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อองค์ประกอบคุณภาพผลผลิตของอ้อยตอ ในทั้ง 4 พารามิเตอร์ที่ศึกษา (ตารางที่ 4.13)

ตารางที่ 4.13 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อองค์ประกอบคุณภาพผลผลิตของอ้อยจากการเก็บเกี่ยวที่อายุ 12 เดือนในพื้นที่ลุ่ม

ปัจจัย		Fibre (%)	Brix (%)	Pol (%)	Purity (%)
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 2	13.05	21.88	19.02	86.91
(A)	อ้อยตอ 3	13.52	21.21	18.37	86.64
% CV (A)		2.48	2.21	2.45	0.22
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	13.31	21.31	18.52	86.95
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	13.26	21.78	18.86	86.60
% CV (B)		0.29	1.54	1.29	0.29
F-test	A x B	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

4.3.2 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่ดอน (สภาพไร่)

4.3.2.1 สมบัติของดินในพื้นที่ดอน (สภาพไร่) ก่อนการใส่ปุ๋ยของการทดลอง

ผลการศึกษาตัวอย่างดินก่อนการทดลองใส่ปุ๋ยต่างชนิด และอายุของอ้อยในพื้นที่ดอนที่ปลูกอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 พบว่า ความเป็นกรดด่างของดิน (1:5) ของพื้นที่ดอน มีค่าอยู่ระหว่าง 5.38-6.45 ซึ่งเป็นดินกรดจัดถึงกรดเล็กน้อย และมีค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ในระหว่างแปลงอ้อยทั้งสองอายุตอ และแปลงทดลองชนิดของปุ๋ย ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (1:5) มีค่าตั้งแต่ 45 ถึง 91 μS/cm และมีค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ระหว่างแปลงอ้อยทั้งสองอายุตอและแปลงทดลองชนิดของปุ๋ย (ตารางที่ 4.14) ปริมาณร้อยละของอินทรียวัตถุในดิน (OM) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.14-1.85 ซึ่งเป็นดินที่มีอินทรียวัตถุในระดับต่ำถึงระดับที่เหมาะสม (1.5-2.5) ในการปลูกอ้อย และมีค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ในระหว่างแปลงอ้อยทั้งสองอายุตอ และแปลงทดลองชนิดของปุ๋ย ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน พบความแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) ในแปลงที่ให้ปุ๋ยต่างชนิดกัน โดยพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินในแปลงที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยมีปริมาณสูงที่สุด (79.84 mg/kg) ส่วนแปลงที่ให้ปุ๋ยเคมีมีค่าเฉลี่ย 58.12 mg/kg ซึ่งทั้งสองแปลงมีปริมาณที่อยู่ในระดับสูง (ตารางที่ 4.15) ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ในพื้นที่ปลูกอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 และชนิดของปุ๋ยที่ให้ แต่พบว่าในแปลงทดลองมีอิทธิพลร่วมกันระหว่าง 2 ปัจจัย โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 89.45-161.40 mg/kg ซึ่งอยู่เกณฑ์ค่าที่เหมาะสม 80-150 mg/kg ในการปลูกอ้อย ส่วนแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) ทั้งในพื้นที่ปลูกอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 และพื้นที่ที่ให้ปุ๋ยต่างชนิดกัน และไม่มีอิทธิพลร่วมกันระหว่างทั้ง 2 ปัจจัย โดยมีค่าเฉลี่ยของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ เท่ากับ 132.32 และ 45.61 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งทั้งพบว่าค่าเฉลี่ยของแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มีค่า 215-487 mg/kg ต่ำกว่าเกณฑ์ที่เหมาะสมในการปลูกอ้อย ส่วนแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม 29-73 mg/kg ในการปลูกอ้อย (กรมวิชาการเกษตร, 2544) (ตารางที่ 4.16)

4.3.2.2 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อสมบัติดินหลังเก็บเกี่ยวอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ดอน

1) ความเป็นกรดด่างของดิน

ผลการทดลองให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปปุ๋ยเคมี (ปุ๋ยเคมี) สำเร็จรูปมาตรฐานและปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ (ปุ๋ยเปลือกหอย) ในการปลูกอ้อยตอบนพื้นที่ดอนต่อความเป็นกรดด่างของดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย อายุ 12 เดือน พบว่า ความเป็นกรดด่างของดินมีความแตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05) ในอายุของอ้อยตอ โดยในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยตอ 1 มีความเป็นกรดด่างของดินสูงกว่าในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยตอ 2 คือ มี pH เฉลี่ย เท่ากับ 6.35 และ 6.05 ตามลำดับ แต่ไม่พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติ (P> 0.05) ระหว่างชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดย pH ของดินที่ให้ปุ๋ยเคมี และเปลือกหอยมีความเป็นกรดด่างของดินเฉลี่ย เท่ากับ 6.17 และ 6.24 ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยที่มีต่อความเป็นกรดด่างของดิน (ตารางที่ 4.14)

2) ค่าการนำไฟฟ้าของดิน

ค่าการนำไฟฟ้าของดินที่เก็บตัวอย่างหลังการเก็บเกี่ยวอ้อยเมื่ออายุ 12 เดือน พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของดินไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มี EC เฉลี่ย เท่ากับ 123.13 และ 140.38 µS/cm ตามลำดับ การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 133.50 และ 130.00 µS/cm ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุตออ้อยและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย (ตารางที่ 4.14)

ตารางที่ 4.14 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อ pH และ EC ของดินก่อนและหลังการทดลองในพื้นที่ดอน

ปัจจัย		pH		EC (µS/cm)	
		ก่อนใส่ปุ๋ย	หลังใส่ปุ๋ย	ก่อนใส่ปุ๋ย	หลังใส่ปุ๋ย
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 1	6.11	6.35[a]	63.88	123.13
(A)	อ้อยตอ 2	5.87	6.05[b]	76.88	140.38
% CV (A)		2.79	3.41	13.06	9.26
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	5.92	6.17	72.88	133.50
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	6.06	6.24	67.88	130.00
% CV (B)		1.73	0.78	5.02	1.88
F-test	A x B	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ ตัวเลขที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

3) ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

ปริมาณอินทรียวัตถุในดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย อายุ 12 เดือน พบว่า ปริมาณอินทรียวัตถุในดินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีอินทรียวัตถุในดินเฉลี่ย เท่ากับ ร้อยละ 1.916 และ 1.76 ตามลำดับ การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ ร้อยละ 1.83 และ 1.84 ตามลำดับ แต่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยการให้ปุ๋ยเปลือกหอยแก่อ้อยตอ 1 พบปริมาณอินทรียวัตถุในดินสูงที่สุด (2.07 %) รองลงมาเป็นการให้ปุ๋ยเคมีแก่อ้อยตอ2 และอ้อยตอ 1 และการให้ปุ๋ยเปลือกหอยกับอ้อยตอ 2 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.15)

4) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย อายุ 12 เดือน พบว่า ปริมาณ available P ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีปริมาณ available P ในดินเฉลี่ย เท่ากับ 106.77 และ 101.29 mg/kg ตามลำดับ การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 92.89 และ 104.91 mg/kg ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (ตารางที่ 4.15)

ตารางที่ 4.15 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณอินทรียวัตถุ และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ของดินก่อนและหลังการทดลองในพื้นที่ดอน

ปัจจัย		OM (%)		available P (mg/kg)	
		ก่อนใส่ปุ๋ย	หลังใส่ปุ๋ย	ก่อนใส่ปุ๋ย	หลังใส่ปุ๋ย
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 1	1.65	1.91	118.55	106.77
(A)	อ้อยตอ 2	1.48	1.76	68.80	101.29
% CV (A)		7.36	5.98	0.38	3.42
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	1.50	1.83	58.12[b]	92.89
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	1.64	1.84	79.84[a]	104.91
% CV (B)		6.34	0.29	22.27	8.60
F-test	A x B	ns	*	ns	ns

หมายเหตุ ตัวเลขที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

5) ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีปริมาณ exchangeable K ในดินเฉลี่ย เท่ากับ 106.77 และ 105.56 mg/kg ตามลำดับ การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 113.35 และ 98.98 mg/kg ตามลำดับ แต่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยการให้ปุ๋ยเคมีแก่อ้อยตอ 1 พบปริมาณ exchangeable K ในดินสูงที่สุด (126.98 mg/kg) รองลงมาเป็นการให้ปุ๋ยเปลือกหอยแก่อ้อยตอ 2 ปุ๋ยเคมีแก่อ้อยตอ 1 และการให้ปุ๋ยเปลือกหอยกับอ้อยตอ 2 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.16)

6) ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในอายุของอ้อยตอ โดยในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มี exchangeable Ca ในดินเฉลี่ย เท่ากับ 146.49 และ 146.54 mg/kg ตามลำดับ แต่พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P< 0.05$) ระหว่างชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยปริมาณ exchangeable Ca ในดินที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยมี exchangeable Ca สูงกว่าการให้ปุ๋ยเคมีกับอ้อยตอ คือ เท่ากับ 161.93 และ 131.10 mg/kg ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน (ตารางที่ 4.16)

7) ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยในพื้นที่ที่ปลูกอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีปริมาณ exchangeable Mg ในดินเฉลี่ย เท่ากับ 46.04 และ 55.13 mg/kg ตามลำดับ การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 45.96 และ 55.21 mg/kg ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน (ตารางที่ 4.16)

ตารางที่ 4.16 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินก่อน และหลังการทดลองในพื้นที่ดอน

ปัจจัย		exchangeable K (mg/kg)		exchangeable Ca (mg/kg)		exchangeable Mg (mg/kg)	
		ก่อนใส่ปุ๋ย	หลังใส่ปุ๋ย	ก่อนใส่ปุ๋ย	หลังใส่ปุ๋ย	ก่อนใส่ปุ๋ย	หลังใส่ปุ๋ย
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 1	118.55	106.77	128.72	146.49	38.85	46.04
(A)	อ้อยตอ 2	107.37	105.56	135.91	146.54	52.38	55.13
% CV (A)		6.99	0.80	20.98	12.69	3.84	0.03
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	119.01	113.35	123.67	131.10^{b}	42.47	45.96
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	106.92	98.98	140.97	161.93^{a}	48.75	55.21
% CV (B)		7.57	9.57	9.74	12.92	9.24	14.88
F-test	A x B	*	*	ns	ns	ns	ns
CV (%)		17.89	21.57	30.68	21.12	18.13	15.16

หมายเหตุ ตัวเลขที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

4.3.2.3 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ดอน

1) ความสูงต้นอ้อย

ผลการทดลองให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปปุ๋ยเคมีและ ปุ๋ยเปลือกหอยที่มีต่อการเจริญเติบโตของอ้อยตอในพื้นที่ดอน (สภาพไร่) พบว่าความสูงของต้นอ้อยที่อายุ 4 เดือน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05) ระหว่างอายุของอ้อยตอ 1 และตอ 2 โดยความสูงต้นของอ้อยตอ 2 มีความสูงมากกว่าในอ้อยตอ 1 คือ 1.52 และ 1.17 m ตามลำดับ ส่วนชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยทำให้ความสูงของต้นอ้อยเฉลี่ยเท่ากับ 1.44 และ 1.26 m ตามลำดับ เมื่ออ้อยอายุ 8 เดือนไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยในอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีความสูงเฉลี่ย เท่ากับ 2.31 และ 2.49 m ตามลำดับ การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 2.43 และ 2.37 m ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย ต่อความสูงของต้นอ้อยทั้งอายุอ้อย 4 และ 8 เดือน (ตารางที่ 4.17)

2) เส้นผ่าศูนย์กลางของลำอ้อย

เส้นผ่าศูนย์กลางของลำอ้อยที่อายุ 4 เดือน พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05) ระหว่างอายุของอ้อยตอ 1 และตอ 2 โดยเส้นผ่าศูนย์กลางของลำของอ้อยตอ 2 มีค่ามากกว่าในอ้อยตอ 1 คือ 32.41 และ 30.48 mm ตามลำดับ ส่วนชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางของลำอ้อยเฉลี่ยเท่ากับ 31.16 และ 31.73 m ตามลำดับ และ 8 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดย อ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีเส้นผ่าศูนย์กลางของลำเฉลี่ย เท่ากับ 26.51 และ 27.36 mm ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 27.29 และ 26.58 mm ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยทั้งเมื่ออายุอ้อย 4 และ 8 เดือน (ตารางที่ 4.17)

3) จำนวนต้น

จำนวนต้นต่อไร่ของอ้อยตอที่อายุ 4 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติทั้งในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดย อ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีจำนวนต้นต่อไร่เฉลี่ย เท่ากับ 14,438.85 และ 13,421.57 ต้น/ไร่ ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 14,270.02 และ 13,590.40 ต้น/ไร่ ตามลำดับ และเมื่ออ้อยอายุ 8 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในอายุของอ้อยตอ โดยอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีจำนวนต้นต่อไร่เฉลี่ย เท่ากับ 13,794.64 และ 12,752.35 ต้น/ไร่ ตามลำดับ แต่ในชนิดของปุ๋ยกลับพบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05) ระหว่างการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอย โดยจำนวนต้นของแปลงอ้อยที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยมีจำนวนมากกว่าการให้ปุ๋ยเคมีแก่อ้อยตอ คือ 13,585.03 และ 12,961.95 ต้น/ไร่ ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยทั้งเมื่ออายุอ้อย 4 และ 8 เดือน (ตารางที่ 4.18)

4) ความเขียวใบ

ความเขียวของใบอ้อยที่วัดเมื่ออ้อยตออายุ 4 และ 8 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยเมื่ออายุอ้อย 4 เดือน อ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีค่า SPAD value เฉลี่ย เท่ากับ 45.52 และ 45.15 ตามลำดับ การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย SPAD value เท่ากับ 43.37 และ 47.29 ตามลำดับ และเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน อ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีค่า SPAD value เฉลี่ย เท่ากับ 43.59 และ 43.96 ตามลำดับ การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย SPAD value เท่ากับ 42.61 และ 44.94 ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยทั้งเมื่ออายุอ้อย 4 และ 8 เดือน (ตารางที่ 4.18)

ตารางที่ 4.17 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อความสูงต้นและเส้นผ่าศูนย์กลางของลำอ้อย หลังจากการให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ดอน

ปัจจัย		ความสูงต้น (m)		เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	
		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)	
		4	8	4	8
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 1	1.17[b]	2.31	30.48[b]	26.51
(A)	อ้อยตอ 2	1.52[a]	2.49	32.41[a]	27.36
% CV (A)		18.69	5.24	4.34	2.23
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	1.44	2.43	31.16	27.29
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	1.26	2.37	31.73	26.58
% CV (B)		9.60	1.92	1.29	1.86
F-test	A x B	ns	ns	ns	ns

ตารางที่ 4.18 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อจำนวนต้นและความเขียวใบของอ้อยหลังจากการให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ดอน

ปัจจัย		จำนวนต้น (ต้น/ไร่)		ความเขียวใบ (SPAD Value)	
		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)	
		4	8	4	8
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 1	14,438.85	13,794.64	45.52	43.59
(A)	อ้อยตอ 2	13,421.57	12,752.35	45.15	43.96
% CV (A)		5.16	5.55	0.58	0.60
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	14,270.02	12,961.95[b]	43.37	42.61
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	13,590.40	13,585.03[a]	47.29	44.94
% CV (B)		3.45	3.32	6.11	3.77
F-test	A x B	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ ตัวเลขที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

4.3.2.4 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณธาตุอาหารพืชในใบอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ดอน

1) ไนโตรเจนทั้งหมดในใบอ้อย

ผลการทดลองให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปปุ๋ยเคมีและ ปุ๋ยเปลือกหอยที่มีต่อการสะสมของธาตุอาหารพืชในใบอ้อยที่ปลูกในพื้นที่ดอน (สภาพไร่) พบว่าการสะสมไนโตรเจนทั้งหมดในใบอ้อยที่อายุ 4 และ 8 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติทั้งในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยเมื่ออายุอ้อย 4 เดือน อ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีปริมาณ N สะสมในใบอ้อยเฉลี่ยเท่ากับ1.85 และ 1.76 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.79 และ 1.82 % ตามลำดับ และเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน อ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีปริมาณการสะสม N เฉลี่ย เท่ากับ 1.78 และ 1.73 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.73 และ 1.79 % ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อการสะสมไนโตรเจนในใบทั้งเมื่ออายุอ้อย 4 และ 8 เดือน (ตารางที่ 4.19)

2) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในใบอ้อย

ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในใบอ้อยตอที่อายุ 4 และ 8 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยเมื่ออายุอ้อย 4 เดือน อ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีปริมาณ P สะสมในใบอ้อยเฉลี่ยเท่ากัน คือ 0.19 % และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.18 และ 0.20 % ตามลำดับ และเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน อ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีปริมาณ P สะสมในใบอ้อยเฉลี่ยเท่ากัน คือ 0.21 % และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยกับอ้อยทำให้มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 0.20 และ 0.22 % ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อการสะสมฟอสฟอรัสในใบทั้งเมื่ออายุอ้อย 4 และ 8 เดือน (ตารางที่ 4.19)

3) **ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในใบอ้อย**

ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในใบอ้อยตอที่อายุ 4 และ 8 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติทั้งในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยเมื่ออายุอ้อย 4 เดือน อ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีปริมาณ K สะสมในใบอ้อยเฉลี่ยเท่ากับ 1.54 และ 1.52 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.57 และ 1.48 % ตามลำดับ และเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน อ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีปริมาณการสะสม K เฉลี่ย เท่ากับ 1.33 และ 1.37 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.48 และ 1.22 % ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อการสะสมโพแทสเซียมในใบทั้งเมื่ออายุอ้อย 4 และ 8 เดือน (ตารางที่ 4.20)

ตารางที่ 4.19 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทั้งหมดของใบอ้อยหลังจากให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ดอน

ปัจจัย		ไนโตรเจน (%) ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน) 4	ไนโตรเจน (%) ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน) 8	ฟอสฟอรัส (%) ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน) 4	ฟอสฟอรัส (%) ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน) 8
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 1	1.85	1.78	0.19	0.21
(A)	อ้อยตอ 2	1.76	1.73	0.19	0.21
% CV (A)		3.73	2.06	0.47	0.84
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	1.79	1.73	0.18	0.20
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	1.82	1.79	0.20	0.22
% CV (B)		1.18	2.26	10.73	8.42
F-test	A x B	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

4) ปริมาณแคลเซียมทั้งหมดในใบอ้อย

การสะสมแคลเซียมทั้งหมดในใบอ้อยที่อายุ 4 เดือน ไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอ 1 และตอ 2 โดยปริมาณ Ca ที่สะสมในใบอ้อยของอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 0.18 และ 0.15 % ตามลำดับ แต่ชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05) โดยการให้ปุ๋ยเปลือกหอยมีการสะสมของแคลเซียมในใบอ้อยสูงกว่าการให้ปุ๋ยเคมี คือ 0.20 และ 0.13 % ตามลำดับ และเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน พบว่าการสะสมแคลเซียมในใบอ้อยเป็นเช่นเดียวกับอ้อยที่อายุ 4 เดือน คือ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอ โดยในอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีปริมาณ Ca เฉลี่ยเท่ากับ 0.16 และ 0.19 % ตามลำดับ ส่วนชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยกลับพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P< 0.05) โดยการให้ปุ๋ยเปลือกหอยมีการสะสมของแคลเซียมในใบอ้อยสูงกว่าการให้ปุ๋ยเคมี คือ 0.22 และ 0.12 % ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อการสะสมแคลเซียมในใบทั้งเมื่ออายุอ้อย 4 และ 8 เดือน (ตารางที่ 4.20)

5) ปริมาณแมกนีเซียมในใบอ้อย

ปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมดในใบอ้อยตอที่อายุ 4 และ 8 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยเมื่ออายุอ้อย 4 เดือน อ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีปริมาณการสะสม Mg ในใบอ้อยเฉลี่ยเท่ากับ 1.55 และ 1.34 % และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 1.38 และ 1.50 % ตามลำดับ และเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน อ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีปริมาณการสะสม Mg เฉลี่ย เท่ากับ 1.70 และ 1.78 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.79 และ 1.69 % ตามลำดับ และไม่พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อการสะสมแมกนีเซียมในใบทั้งเมื่ออายุอ้อย 4 และ 8 เดือน (ตารางที่ 4.20)

ตารางที่ 4.20 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมทั้งหมดของใบอ้อย หลังจากการให้ปุ๋ยเป็นเวลา 4 และ 8 เดือนในพื้นที่ดอน

ปัจจัย		โพแทสเซียม(%)		แคลเซียม (%)		แมกนีเซียม (%)	
		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)		ระยะเวลาหลังจากให้ปุ๋ย (เดือน)	
		4	8	4	8	4	8
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ1	1.54	1.33	0.18	0.16	1.55	1.70
(A)	อ้อยตอ2	1.52	1.37	0.15	0.19	1.34	1.78
% CV (A)		1.04	1.97	16.19	11.35	10.30	3.46
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	1.57	1.48	0.13[b]	0.12[b]	1.38	1.79
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	1.48	1.22	0.20[a]	0.22[a]	1.50	1.69
% CV (B)		4.29	13.38	33.47	42.32	6.01	4.27
F-test	A x B	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)		15.12	16.11	43.86	43.22	23.57	22.11

หมายเหตุ ตัวเลขที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

4.3.2.5 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตอ้อยในพื้นที่ดอน

ผลการทดลองให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปปุ๋ยเคมีและ ปุ๋ยเปลือกหอยกับอ้อยตอที่ปลูกในพื้นที่ดอน และเก็บเกี่ยวในเดือนธันวาคม 2559 เมื่ออ้อยมีอายุ 12 เดือน พบว่าความยาวลำของอ้อยที่วัดจากโคนต้นซึ่งตัดชิดพื้นดิน ถึงจุดหักธรรมชาติ (natural break point) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P< 0.05$) ระหว่างอายุของอ้อยตอ 1 และตอ 2 โดยความยาวลำของอ้อยตอ 2 มีมากกว่าอ้อยตอ 1 โดยความยาวของลำอ้อยเฉลี่ยเท่ากับ 2.89 และ 2.59 m ตามลำดับ ส่วนชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยทำให้ความยาวลำของอ้อยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.83 และ 2.65 m ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อความยาวลำของอ้อยตอ (ตารางที่ 4.21)

เส้นผ่าศูนย์กลางลำของอ้อยที่วัดตรงโคน กึ่งกลาง และปลายของลำอ้อยแล้วนำมาเฉลี่ย พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติทั้งในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยเส้นผ่าศูนย์กลางลำของอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 29.12 และ 27.22 mm ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.24 และ 28.10 mm ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อเส้นผ่าศูนย์กลางลำของอ้อยตอ (ตารางที่ 4.21)

น้ำหนักลำอ้อยที่ชั่งได้เมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตอ้อ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติทั้งในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยเส้นผ่าศูนย์กลางลำของอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.70 และ 1.77 kg/ลำ ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.76 และ 1.71 kg/ลำ ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อน้ำหนักต่อลำของอ้อยตอ (ตารางที่ 4.21)

จำนวนลำอ้อยที่เก็บเกี่ยวได้ต่อไร่ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยจำนวนลำต่อไร่ของอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12,414.75 และ 11,486.15 ลำ/ไร่ ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีจำนวนลำต่อไร่เฉลี่ย เท่ากับ 11,743.30 และ 12,157.60 ลำ/ไร่ ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อจำนวนลำอ้อยที่เก็บเกี่ยวได้ของอ้อยตอ (ตารางที่ 4.21)

ตารางที่ 4.21 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตอ้อยจากการเก็บเกี่ยวที่อายุ 12 เดือนในพื้นที่ดอน

ปัจจัย		ความยาวลำ (m.)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	น้ำหนักลำ (kg/ลำ)	จำนวนลำ/ไร่ (ลำ/ไร่)
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 1	2.59[b]	29.12	1.70	12,414.75
(A)	อ้อยตอ 2	2.89[a]	27.22	1.77	11,486.15
% CV (A)		7.89	4.77	2.80	5.49
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	2.83	28.24	1.76	11,743.30
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	2.65	28.10	1.71	12,157.60
% CV (B)		4.70	0.35	1.89	2.45
F-test	A x B	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ ตัวเลขที่กำกับด้วยอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)
ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

น้ำหนักผลผลิตของอ้อยที่เก็บเกี่ยวได้ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ในอายุของอ้อยตอ 1 และตอ 2 โดยน้ำหนักของผลผลิตที่ได้ของอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีผลผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 21.14 และ 20.23 ตัน/ไร่ ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยมีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 20.67 และ 20.71 ตัน/ไร่ ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อน้ำหนักสดของผลผลิตอ้อยตอ (ตารางที่ 4.22)

คุณภาพของอ้อยที่เกิดขึ้นจากการให้ปุ๋ยชนิดต่าง ๆ ในอ้อยตอ ที่เป็นองค์ประกอบของผลผลิตน้ำตาล ในรูปของ commercial cane sugar (CCS) จากการเก็บเกี่ยวอ้อยเมื่ออายุ 12 เดือน พบว่า CCS ของอ้อยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยปริมาณ CCS ของอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.20 และ 13.97 CCS ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยเฉลี่ย เท่ากับ 14.36 และ 13.80 CCS ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อคุณภาพอ้อย (CCS) ของอ้อยตอ (ตารางที่ 4.22)

ผลผลิตของน้ำตาลที่คำนวณได้จากน้ำนักผลผลิตและคุณภาพอ้อย (CCS) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติทั้งในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยผลผลิตของน้ำตาลที่ได้จากอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.00 และ 2.83 ตัน/ไร่ ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยทำให้มีผลผลิตของน้ำตาลเฉลี่ยเท่ากับ 2.98 และ 2.86 ตัน/ไร่ ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยตอ (ตารางที่ 4.22)

ตารางที่ 4.22 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตอ้อยจากการเก็บเกี่ยวที่อายุ 12 เดือนในพื้นที่ดอน

ปัจจัย		ผลผลิต (ตัน/ไร่)	CCS	ผลผลิตน้ำตาล (ตัน/ไร่)
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 1	21.14	14.20	3.00
(A)	อ้อยตอ 2	20.23	13.97	2.83
% CV (A)		3.09	1.14	2.04
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	20.67	14.36	2.98
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	20.71	13.80	2.86
% CV (B)		0.14	2.84	2.71
F-test	A x B	ns	ns	ns

หมายเหตุ ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

4.3.2.6 ผลของอายุอ้อยและชนิดของปุ๋ยต่อองค์ประกอบคุณภาพผลผลิตของอ้อยในพื้นที่ดอน

องค์ประกอบคุณภาพของผลผลิตอ้อย ประกอบด้วย เปอร์เซ็นต์ของไฟเบอร์ (% fibre) บริกซ์ (% Brix) โพล (% pol) และความบริสุทธิ์ของน้ำอ้อย (% purity) ซึ่งวัดได้จากอ้อยที่เก็บเกี่ยวเมื่ออายุ 12 เดือน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย ทั้ง 4 พารามิเตอร์ที่ศึกษา โดยเปอร์เซ็นต์ไฟเบอร์ของอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 13.44 และ 12.99 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยเฉลี่ย เท่ากับ 13.37 และ 13.06 % ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์บริกซ์ของอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20.81 และ 20.71 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยเฉลี่ย เท่ากับ 21.04 และ 20.48 % ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์โพลของอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 18.69 และ 18.41 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยเฉลี่ย เท่ากับ 18.90 และ 18.21 % ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของน้ำอ้อยของอ้อยตอ 1 และอ้อยตอ 2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 89.73 และ 88.86 % ตามลำดับ และการให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยเฉลี่ย เท่ากับ 89.79 และ 88.80 % ตามลำดับ และไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างอายุของอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยต่อองค์ประกอบคุณภาพผลผลิตของอ้อยตอ ในทั้ง 4 พารามิเตอร์ที่ศึกษา (ตารางที่ 4.23)

ตารางที่ 4.23 ผลของอายุอ้อยตอและชนิดของปุ๋ยต่อองค์ประกอบคุณภาพผลผลิตของอ้อยจากการเก็บเกี่ยวที่อายุ 12 เดือนในพื้นที่ดอน

ปัจจัย		Fibre (%)	Brix (%)	Pol (%)	Purity (%)
อายุอ้อยตอ	อ้อยตอ 1	13.44	20.81	18.69	89.73
(A)	อ้อยตอ 2	12.99	20.71	18.41	88.86
% CV (A)		2.43	0.35	1.06	0.68
ชนิดปุ๋ย	ปุ๋ยเคมี	13.37	21.04	18.90	89.79
(B)	ปุ๋ยเปลือกหอย	13.06	20.48	18.21	88.80
% CV (B)		1.69	1.89	2.62	0.78
F-test	A x B	ns	ns	ns	ns
CV (%)		5.17	5.75	7.38	2.05

หมายเหตุ ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

4.4 ต้นทุนการผลิต และผลตอบแทนจากการปลูกอ้อย

ผลการบันทึกข้อมูลต้นทุนการปลูกอ้อย ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการผลิตอ้อยเบื้องต้นซึ่งจะเป็นค่าใช้จ่ายในการดูแล บำรุงอ้อยตอ ประกอบด้วย ค่าแรงงาน ค่าวัสดุสารเคมี ค่าจ้างเครื่องจักรกลการเกษตร ค่าระบบการให้น้ำ ค่าพลังงาน และค่าเก็บเกี่ยวและขนส่ง ซึ่งค่าใช้จ่ายทั้งหมดยกเว้นค่าปุ๋ยจะเป็นค่าใช้จ่ายอัตราเดียวกันในทุกแปลง ส่วนค่าเก็บเกี่ยวและขนส่งอ้อยจะเป็นอัตราที่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักผลผลิตอ้อยสด คือ 350 บาท/ตันอ้อยสด และค่าปุ๋ยจะคิดตามราคาตลาดในฤดูการผลิต 2559/2560 คือ ยูเรีย (46-0-0), โพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-60) และ สูตร 15-15-15 กระสอบละ 500, 650 และ 810 บาท ตามลำดับ และปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ 20.60 บาท/กิโลกรัม ดังนั้น จากอัตราการใช้ 100 กิโลกรัม/ไร่ จะเป็นค่าปุ๋ยเคมี 1,620 บาท/ไร่ และปุ๋ยเปลือกหอยเป็นดังนี้

ปุ๋ยยูเรีย	32.6 กิโลกรัม	จำนวนเงิน	326.00	บาท
ปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่	27.4 กิโลกรัม	จำนวนเงิน	564.44	บาท
ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์	25.0 กิโลกรัม	จำนวนเงิน	325.00	บาท
		รวม	1,215.44	บาท/ไร่

การปลูกอ้อยในพื้นที่ลุ่ม จากตารางที่ 4.24 ค่าลงทุนส่วนใหญ่ในการผลิตอ้อย คือ ค่าเก็บเกี่ยวและขนส่ง ระบบการให้น้ำ และค่าปุ๋ย ตามลำดับ โดยค่าลงทุนก่อนคิดค่าเก็บเกี่ยวพบว่าแปลงอ้อยที่มีการให้ปุ๋ยเคมีจะมีค่าลงทุนที่สูงกว่าแปลงที่ให้ปุ๋ยจากเปลือกหอยทั้งในอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 และเมื่อรวมค่าเก็บเกี่ยวและขนส่งแปลงอ้อยตอ 2 ที่ให้ปุ๋ยเคมีใช้ค่าลงทุนในการผลิตอ้อยสูงที่สุด รองลงมาเป็นอ้อยตอ 2 ให้ปุ๋ยเปลือกหอย อ้อยตอ 3 ให้ปุ๋ยเคมี และอ้อยตอ 3 ให้ปุ๋ยเปลือกหอย ตามลำดับ

การปลูกอ้อยในพื้นที่ดอน จากตารางที่ 4.25 ค่าลงทุนส่วนใหญ่ในการผลิตอ้อย คือ ค่าเก็บเกี่ยวและขนส่ง ค่าปุ๋ย และค่าระบบการให้น้ำ ตามลำดับ ทั้งนี้ในพื้นที่ดอนเป็นการให้น้ำตามร่องอ้อยโดยปล่อยน้ำตามแรงโน้มถ่วง จึงไม่มีค่าพลังงาน โดยค่าลงทุนก่อนคิดค่าเก็บเกี่ยวและขนส่ง พบว่าแปลงอ้อยที่มีการให้ปุ๋ยเคมีจะมีค่าลงทุนที่สูงกว่าแปลงที่ให้ปุ๋ยจากเปลือกหอยเช่นเดียวกับในพื้นที่ลุ่ม และเมื่อรวมค่าเก็บเกี่ยวและขนส่งแปลงอ้อยตอ 1 ที่ให้ปุ๋ยเคมีมีใช้ค่าลงทุนในการผลิตอ้อยสูงที่สุด รองลงมาเป็น อ้อยตอ21 ให้ปุ๋ยเคมี, อ้อยตอ 2 ให้ปุ๋ยเปลือกหอย และอ้อยตอ 2 ให้ปุ๋ยเปลือกหอย ตามลำดับ

ผลตอบแทนที่ได้จากการผลิตอ้อย จะคิดจากราคาขายอ้อยขั้นต้นที่เกษตรกรได้รับจากการขายผลผลิตเป็นจำนวนตามน้ำหนักอ้อยสดในฤดูการผลิต 2559/2560 รวมกับอัตราขึ้น-ลงของราคาอ้อยต่อ 1 หน่วย CCS ต่อเมตริกตัน ในฤดูการผลิตปี 2559/2560 ราคาอ้อยขั้นต้น 1,083.86 บาทต่อตันอ้อย ณ ระดับความหวานที่ 10 CCS กำหนดอัตราขึ้นลงเท่ากับ 65.03 บาท ต่อ 1 หน่วย CCS ต่อเมตริกตัน (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2561) โดยวิเคราะห์เป็นผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ในรูปของผลตอบแทนต่อค่าลงทุน (B/C ratio)

ตารางที่ 4.24 ต้นทุนในการผลิตอ้อยในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา) ฤดูการผลิต 2559/2560 (บาท/ไร่)

	อ้อยตอ 2		อ้อยตอ 3	
	ปุ๋ยเคมี	ปุ๋ยเปลือกหอย	ปุ๋ยเคมี	ปุ๋ยเปลือกหอย
1. ค่าแรงงาน				
ฉีดยากำจัดวัชพืช	150	150	150	150
ดายหญ้า	100	100	100	100
ใส่ปุ๋ยและเตรียมปุ๋ย	200	200	200	200
2. ค่าวัสดุสารเคมี				
ค่าปุ๋ย	1,620	1,215.44	1,620	1,215.44
สารเคมีกำจัดวัชพืช	250	250	250	250
3. ค่าจ้างเครื่องจักรกล				
ค่าไถตัดราก	200	200	200	200
ค่าตัดแต่งตอ	200	200	200	200
4. ค่าระบบน้ำ	1,870	1,870	1,870	1,870
5. ค่าพลังงาน	250	250	250	250
รวม	4,840	4,435.44	4,840	4,435.44
6. ค่าเก็บเกี่ยวและขนส่ง	7,406.66	7,438.97	6,496.71	6,594.28
รวมค่าลงทุน (บาท/ไร่)	12,246.66	11,874.41	11,336.71	11,029.72

ตารางที่ 4.25 ต้นทุนในการผลิตอ้อยในพื้นที่ดอน (สภาพไร่) ฤดูการผลิต 2559/2560 (บาท/ไร่)

	อ้อยตอ 1		อ้อยตอ 2	
	ปุ๋ยเคมี	ปุ๋ยเปลือกหอย	ปุ๋ยเคมี	ปุ๋ยเปลือกหอย
1. ค่าแรงงาน				
ฉีดยากำจัดวัชพืช	150	150	150	150
ดายหญ้า	100	100	100	100
ใส่ปุ๋ยและเตรียมปุ๋ย	200	200	200	200
2. ค่าวัสดุสารเคมี				
ค่าปุ๋ย	1,620	1,215.44	1,620	1,215.44
สารเคมีกำจัดวัชพืช	250	250	250	250
3. ค่าจ้างเครื่องจักรกล				
ค่าไถตัดราก	200	200	200	200
ค่าตัดแต่งตอ	200	200	200	200
4. ค่าระบบน้ำ	945	945	945	945
รวม	3,665	3,260.44	3,665	3,260.44
5. ค่าเก็บเกี่ยวและขนส่ง	7,244.05	7,553.11	7,222.36	6,941.42
รวมค่าลงทุน (บาท/ไร่)	10,909.05	10,813.55	10,887.36	10,201.86

การปลูกอ้อยในพื้นที่ลุ่มอ้อยตอ 2 ได้ผลตอบแทนเฉลี่ยสูงกว่าอ้อยตอ 3 โดยแปลงที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยได้ผลตอบแทนสูงกว่าการให้ปุ๋ยเคมีในทั้ง 2 อายุอ้อย และเมื่อพิจารณาทั้งวิธีการให้ปุ๋ยและอายุของอ้อย ก็พบว่า อ้อยตอ 2 ที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอย ได้ผลตอบแทนและกำไรเฉลี่ยจากการปลูกอ้อยสูงที่สุด คือ 28,864.82 และ 16,990.42 บาท/ไร่ ตามลำดับ รองลงมาเป็นอ้อยตอ 2 ให้ปุ๋ยเคมี อ้อยตอ 3 ให้ปุ๋ยเปลือกหอย และอ้อยตอ 3 ให้ปุ๋ยเคมี ตามลำดับ ซึ่งเป็นในแนวทางเดียวกันกับอัตราส่วนผลตอบแทนต่อค่าลงทุนในการปลูกอ้อย ก็ได้ผลเช่นเดียวกันคือ อ้อยตอ 2 ที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอย ได้ B/C ratio จากการปลูกอ้อยสูงที่สุด คือ 2.43 รองลงมาเป็นอ้อยตอ 2 ให้ปุ๋ยเคมี อ้อยตอ 3 ให้ปุ๋ยเปลือกหอย และอ้อยตอ 3 ให้ปุ๋ยเคมี ตามลำดับ (ตารางที่ 4.26)

การปลูกอ้อยในพื้นที่ดอน พบว่า อ้อยตอ 1 ได้ผลตอบแทนและกำไรเฉลี่ยสูงกว่าอ้อยตอ 2 โดยแปลงที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยได้ผลตอบแทนสูงกว่าการให้ปุ๋ยเคมีในอ้อยตอ 1 ส่วนในอ้อยตอ 2 การให้ปุ๋ยเคมีแก่อ้อยได้ผลตอบแทนจากการปลูกอ้อยสูงกว่าการให้ปุ๋ยเปลือกหอย และเมื่อพิจารณาทั้งวิธีการให้ปุ๋ยและอายุของอ้อย ก็พบว่า อ้อยตอ 1 ที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอย ได้ผลตอบแทนและกำไรเฉลี่ยจากการ

ปลูกอ้อยสูงที่สุด คือ 28,388.53 และ 17,574.98 บาท/ไร่ รองลงมาเป็นอ้อยตอ 2 ให้ปุ๋ยเคมี อ้อยตอ 3 ให้ปุ๋ยเปลือกหอย และอ้อยตอ 3 ให้ปุ๋ยเคมี ตามลำดับ ซึ่งเป็นในแนวทางเดียวกันกับอัตราส่วนผลตอบแทนต่อค่าลงทุนในการปลูกอ้อย ก็ได้ผลเช่นเดียวกันคือ อ้อยตอ 1 ที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอย ได้ B/C ratio จากการปลูกอ้อยสูงที่สุด คือ 2.63 รองลงมาเป็นอ้อยตอ 2 ให้ปุ๋ยเปลือกหอย และอ้อยที่ให้ปุ๋ยเคมีในทั้ง 2 อายุอ้อย ตามลำดับ (ตารางที่ 4.27)

ตารางที่ 4.26 ผลตอบแทนที่ได้จากการปลูกอ้อยในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา)

ชนิดอ้อย	ผลผลิต (ตัน/ไร่)	CCS	ผลตอบแทน (บาท/ไร่)			กำไร (บาท/ไร่)	B/C ratio
			ผลผลิต	CCS	รวม		
อ้อยตอ 2							
แปลงปุ๋ยเคมี	21.16	14.20	22,918.32	5,772.98	28,691.30	16,444.64	2.34
แปลงปุ๋ยเปลือกหอย	21.25	14.23	23,018.29	5,846.54	28,864.82	16,990.42	2.43
อ้อยตอ 3							
แปลงปุ๋ยเคมี	18.56	13.42	20,102.68	4,122.21	24,224.89	12,888.18	2.14
แปลงปุ๋ยเปลือกหอย	18.84	13.83	20,404.57	4,686.45	25,091.02	14,061.31	2.27

ตารางที่ 4.27 ผลตอบแทนที่ได้จากการปลูกอ้อยในพื้นที่ดอน (สภาพไร่)

ชนิดอ้อย	ผลผลิต (ตัน/ไร่)	CCS	ผลตอบแทน (บาท/ไร่)			กำไร (บาท/ไร่)	B/C ratio
			ผลผลิต	CCS	รวม		
อ้อยตอ 1							
แปลงปุ๋ยเคมี	20.70	14.37	22,415.17	5,881.78	28,296.95	17,387.90	2.59
แปลงปุ๋ยเปลือกหอย	21.58	14.02	23,371.49	5,641.54	29,013.03	18,199.48	2.68
อ้อยตอ 2							
แปลงปุ๋ยเคมี	20.64	14.36	22,348.04	5,850.75	28,198.79	17,311.43	2.59
แปลงปุ๋ยเปลือกหอย	19.83	13.58	21,478.73	4,617.18	26,095.91	15,894.05	2.56

บทที่ 5
วิจารณ์ผลการวิจัย

5.1 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีอย่างง่าย

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate; $CaCO_3$) และสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้ โดยวิธีการเตรียมอย่างง่าย ที่เตรียมได้โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X- ray fluorescence; XRF) เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการยิงรังสีเอกซ์จะถูกยิงผ่านตัวอย่าง ทำให้ธาตุที่อยู่ในตัวอย่างดูดกลืนรังสีเอกซ์แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คาย (fluorescene) ออกมาจะมีค่าพลังงานแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่าง ทำให้สามารถแยกองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้ว่าประกอบด้วยธาตุใด โดยใช้ detector วัดค่าพลังงานที่คายออกมาจากตัวอย่าง เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของสารที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกหอยเชอรี่ พบว่า สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารทั้งสองชนิดดังนี้ $CaCO_3$ (Ca:O ratio of 1.10:3.31) และโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรท (monocalcium phosphate monohydrate; $Ca(H_2PO_4)_2{\bullet}H_2O$ (MCPM)) (Ca:P ratio of 1.00:2.05) ซึ่งข้อมูลสอดคล้องกับทฤษฎี (Montañez-Supelano et al., 2017) นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเปลือกหอยเชอรี่ในรูปสารประกอบออกไซด์ พบว่า เปลือกหอยเชอรี่มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงถึงร้อยละ 99.3 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียม (Ca) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) พบว่า มีปริมาณสูงกว่าค่าที่ควรจะเป็นตามทฤษฎี กล่าวคือแคลเซียมคาร์บอเนตบริสุทธิ์ ($CaCO_3$) เมื่อเกิดการสลายตัวควรจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เหลืออยู่ประมาณร้อยละ 56 เท่านั้น และควรมีปริมาณแคลเซียม (Ca) เป็นองค์ประกอบเท่ากับร้อยละ 40 (รัตนาภรและคณะ, 2554) ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากขีดจำกัดในการวิเคราะห์ของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ไม่สามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งเป็นองค์ประกอบในแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ได้ จึงทำให้ผลการคำนวณปริมาณแคลเซียม (Ca) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) คลาดเคลื่อนไป

สำหรับโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรท (MCPM) พบว่ามีปริมาณฟอสฟอรัส 21% ปราศจากการปนเปื้อนของสารพิษซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด ดังนั้น จึงสามารถนำโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรทที่เตรียมได้ไปใช้สำหรับเป็นเกลือแร่เสริมในอาหารสัตว์ (feed minerals) และวัตถุปรุงแต่งเจือปนในอาหาร (food additives) เมื่อคำนวณเป็นฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (phosphorus

pentoxide (P_2O_5)) จะมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ที่คำนวณได้จาก $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ มีปริมาณมากกว่า 56% เทียบเท่ากับปุ๋ยซุปเปอร์ฟอสเฟต (superphosphate fertilizer) และสารประกอบที่เตรียมได้มีเปอร์เซ็นต์ผลผลิต (percentage yield) สูง และปราศจากสิ่งปนเปื้อนมีความบริสุทธิ์สูง และสิ่งเจือปนที่เป็นสารพิษในสารสังเคราะห์อยู่ภายใต้การควบคุมที่ได้ตามมาตรฐาน ดังนั้น สารประกอบที่เตรียมได้จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายมากขึ้น เช่น ใช้เป็นวัตถุปรุงแต่งในอาหาร และใช้ในทางการแพทย์ เช่น เป็นวัสดุทดแทนกระดูก เป็นต้น (Dorozhkin, 2013)

ผงแคลเซียมคาร์บอเนต และโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรท (MCPM) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffraction (XRD) ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) นำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานของสถาบัน ICDD (International Center for Diffraction Data) ในระบบฐานข้อมูล the Powder Diffraction File™ (PDF) ได้ผลสอดคล้องกับ PDF No. 75-2230 สำหรับโครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต มีรูปผลึกระบบออร์โธรอมบิก (orthorhombic) ซึ่งมี space group Pmcn ชนิดอะราโกไนท์ (aragonite, $CaCO_3$) (Mirhadi et al., 2011 ; Zou et al., 2011) และ MCPM สอดคล้องกับ PDF No. 76-1822 ซึ่งเป็นลักษณะของโครงสร้างผลึกเป็นแบบ anorthic ซึ่งเป็นระบบผลึกแบบที่มีด้านทั้ง 3 ยาวไม่เท่ากัน และยังมีมุมระหว่างด้านทั้ง 3 ด้านไม่เป็นมุมฉาก (Xu et al., 1998 ; Xu et al., 1999) ซึ่งเป็นผลยืนยันผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชั่นที่เป็นองค์ประกอบของ MCPM

โครงสร้างและองค์ประกอบโมเลกุลของสารที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) เป็นการตรวจวิเคราะห์เพื่อหาโครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุลของสาร ทั้งชนิดของสารที่เป็นสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยอาศัยหลักการของการดูดกลืนคลื่นรังสีช่วงอินฟราเรด (Infrared) พันธะเคมีในโมเลกุลของสารจะดูดกลืนพลังงานในค่าความยาวคลื่นหนึ่ง ข้อมูลดังกล่าวจะถูกประมวลโดยคอมพิวเตอร์โดยการใช้สมการเชิงอนุพันธ์ที่เรียกว่าฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform) ซึ่งจะคำนวณพลังงานของแต่ละความยาวคลื่นและแปรผลออกมาเป็นสเปกตรัม สารแต่ละชนิดซึ่งมีลักษณะสเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะ ทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของสารตัวอย่างได้โดยเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่มีอยู่ในฐานข้อมูล (วรางคณา, 2546) ผลจากการตรวจวิเคราะห์ของผงแคลเซียมคาร์บอเนต (CC) ลักษณะการสั่นที่พบใน CC มีลักษณะโครงสร้างผลึกของ CO_3^{2-} ที่เป็นชนิดอะราโกไนต์ (aragonite) สอดคล้องกับการวิจัยของ Andersen and Brecevic (1991), Boey et al. (2011), Hu et al. (2001), Hamester et al. (2012) และ Hsu (2003) และสเปกตรัมการดูดกลืนแสงรังสีอินฟราเรดของ MCPM พบว่ามีการสั่นของไอออนลบของ $H_2PO_4^-$ และโมเลกุลของน้ำ บริเวณที่มีแบนด์ของการสั่น

แบบยืดที่แข็งแรงของพันธะ P-O ที่ 1150-950 cm^{-1} บริเวณที่มีการสั่นแบบงอของพันธะ O-P-O ที่ 450-600 cm^{-1} บริเวณที่มีการสั่นแบบงอของ couple band ของ P-O-H ที่อยู่ในระนาบเดียวกัน (*A2*) และการสั่นแบบงออยู่ต่างระนาบ (*A1*) ที่ 1250 และ 790 cm^{-1} ตามลำดับ ลักษณะของแบนด์ที่อ่อนที่เกิดขึ้นในสเปกตรัมการดูดกลืนแสงรังสีอินฟราเรดที่ประมาณ 682 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของโมเลกุลของน้ำ บริเวณที่มีการสั่นแบบยืดของพันธะ O-H ของไอออนลบ $H_2PO_4^-$ ปรากฏลักษณะของ A, B, C trio bands ที่ 3130-3180 cm^{-1} (A band), 2380-2440 cm^{-1} (B band) และ 1670-1800 cm^{-1} (C band) ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องการงานวิจัยของ Boonchom (2009), Boonchom and Danvirutai (2009) และ Hsu (2003) และการศึกษาสัณฐานวิทยาของ CC และ MCPM ที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ที่กำลังขยาย .x10,000 และ x20,000 เท่า ตามลำดับ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ CC มีลักษณะเป็นผลึกที่เรียกว่า lumber-like crystals ซึ่งมีลักษณะเหมือนเปลือกไม้ และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ MCPM มีลักษณะเป็นผลึกที่การเชื่อมต่อรวมตัวกันเป็นแผ่นแบนคล้ายจานที่มีรูปร่างไม่แน่นอน

5.2 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีอนุภาคขนาดเล็ก

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หรือ X-ray Diffraction (XRD) ในการวิเคราะห์สมบัติของสารโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ของผง $CaCO_3$ และ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ ที่เตรียมได้ และนำค่าความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ที่วัดได้ (intensity) กับมุมที่ทำการวัด (2-theta) จากกราฟมาเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานของสถาบัน ICDD (International Center for Diffraction Data) ในระบบฐานข้อมูล the Powder Diffraction File™ (PDF) สอดคล้องกับข้อมูลในระบบฐานข้อมูล PDF คือ PDF No. 75-2230 และ PDF No. 70-0360 (Zavgorodniy et al., 2011) ของผง $CaCO_3$ และ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ ตามลำดับ ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จากกราฟไม่พบสารปนเปื้อนหรือสารตัวกลางอื่น ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าในกระบวนการสังเคราะห์ได้สารประกอบบริสุทธิ์ และเมื่อศึกษาโครงสร้างของผลึกที่ได้ในระบบผลึกออร์โธรอมบิก (orthorhombic) เป็นชนิดอะราโกไนท์ (aragonite) และ อะนอธิก (anorthic) (Miki and Kai, 1991) ของ $CaCO_3$ และ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ ตามลำดับ

การศึกษาด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอรม์อินฟราเรดสเปคโตรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) เป็นการตรวจวิเคราะห์เพื่อหาโครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุลของสาร ทั้งชนิดที่เป็นสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยอาศัยหลักการของการดูดกลืนคลื่นรังสีช่วงอินฟราเรด (infrared) พันธะเคมีในโมเลกุลของสารจะดูดกลืนพลังงานในค่าความยาวคลื่นหนึ่ง

ข้อมูลที่ได้จะถูกประมวลด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้สมการเชิงอนุพันธุ์ที่เรียกว่าฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform) ซึ่งจะคำนวณพลังงานของแต่ละความยาวคลื่นและแปรผลออกมาเป็นสเปกตรัม สารแต่ละชนิดซึ่งมีลักษณะสเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะ ทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของสารตัวอย่างได้โดยเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่มีอยู่ในฐานข้อมูล (วรางคณา, 2546) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าสเปกตรัมของผง $CaCO_3$ และ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ ที่เตรียมได้มีลักษณะของสเปกตรัมสอดคล้องกับการสั่นที่เกิดขึ้นของไอออนลบ CO_3^{2-}, HPO_4^{2-}, PO_4^{3-} และโมเลกุลของน้ำของสาร $CaCO_3$ และ $CaHPO_4{\cdot}2H_2O$ ตามรายงานวิจัยของ Macha et al. (2013), Wang et al. (2009) และ Xu et al. (1999)

การศึกษาสัณฐานวิทยาของผง $CaCO_3$ และ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ผงของ $CaCO_3$ และสารประกอบ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาและขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน แสดงว่าสารประกอบที่เตรียมได้แต่ละชนิดเป็นสารประกอบต่างชนิดกัน สำหรับอนุภาคของผง $CaCO_3$ มีลักษณะรูปร่างเป็น wooden fiber-like มีผิวหน้าแข็ง และขรุขระ และมีการเกาะรวมตัว (agglomeration) กันบนผิวสัมผัสซึ่งมีลักษณะรูปร่างและขนาดที่ไม่แน่นอน ส่วนอนุภาคของผง $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ ที่เตรียมได้ มีลักษณะรูปร่างเป็น grainy rice-like และมีการเกาะรวมตัวทั้งที่มีขนาดใหญ่และขนาดเล็ก จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ได้แตกต่างกับงานวิจัยของ Cuneyt Tas (2016), Dosen (2011), Wang et al. (2009) และ Mirhadi et al. (2011)

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และไดแคลเซียมฟอสเฟตไฮเดรท ($CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$) โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน หรือ thermogravimetric analysis (TGA) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของสารที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยใช้การวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวและความละเอียดสูง พบว่า การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ (TG curve) ในช่วงอุณหภูมิ 100-775 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนักเป็น 55.02% และ 75.53% และมีปฏิกิริยาเกิดขึ้น 2 และ 3 ขั้น ใน $CaCO_3$ และ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ ตามลำดับ การสูญเสียมวลทั้งหมด (total mass losses) ของ $CaCO_3$ และ $CaHPO_4{\cdot}1.9H_2O$ ที่เตรียมได้ มีค่าเป็น 44.98% และ 24.47% ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ได้ดังกล่าวนี้มีค่าใกล้เคียงกันกับค่าคำนวณที่ได้ตามทฤษฎีและสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cuneyt Tas (2016) และ Dosen and Giese (2011) สำหรับปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงความร้อน (thermal transformation) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่ใช้ความร้อน (thermal data) ที่แสดงให้เห็นว่าสภาวะของอุณหภูมิ (temperature condition) ที่สูงกว่า 750 ^{o}C สามารถใช้ในการสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_3(PO_4)_2$) โดยผ่านปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (solid state reaction) ของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และไดแคลเซียมฟอสเฟตไฮเตรท

($CaHPO_4 \cdot 1.9H_2O$) ใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_3(PO_4)_2$) และจากการทดลองใช้สภาวะอุณหภูมิที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ซึ่งสภาวะที่ใช้ดังกล่าวมีอุณหภูมิต่ำกว่าและใช้เวลาน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการศึกษาของ Wang et al. (2009) และ Mirhadi et al. (2011)

5.3 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา

5.3.1 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา)

5.3.1.1 สมบัติของดินในพื้นที่ลุ่ม (สภาพนา) ก่อนการการทดลอง

เกษตรกรมีการใช้ประโยชน์ที่ดินในการทำนาปีก่อนการปลูกอ้อย โดยเกษตรกรให้ปุ๋ยสูตร 16-16-8 อัตรา 25 กิโลกรัม/ไร่ เมื่อเปลี่ยนการใช้ประโยชน์จากนาข้าวมาปลูกอ้อย มีการให้ปุ๋ยแก่อ้อยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัม/ไร่ ผลผลิตอ้อยเฉลี่ยที่เกษตรกรได้ในฤดูการผลิตอ้อย 2558/2559 เท่ากับ 18 ตัน/ไร่ (ข้อมูลการสัมภาษณ์เกษตรกร) จากข้อมูลสมบัติทางเคมีของดินที่เก็บตัวอย่างดินความลึก 0-30 เซนติเมตร หลังการเก็บเกี่ยวอ้อยฤดูการผลิต 2558/2559 ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาก่อนการทดลอง พบว่า ในบริเวณพื้นที่อ้อยตอ 2 มี ค่าเฉลี่ยของความเป็นกรดด่างของดิน (1:5) ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (1:5) ปริมาณร้อยละของอินทรียวัตถุ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน คือ 5.58, 104.38 μS/cm , 1.66 %, 28.19, 65.70, 330.22 และ 46.46 mg/kg ตามลำดับ และในพื้นที่อ้อยตอ 3 มีค่าเท่ากับ 5.56, 83.75 μS/cm , 1.57 %, 31.17, 53.04, 362.02 และ 45.26 mg/kg ตามลำดับ โดยทั่วไปพื้นที่ปลูกอ้อยทั้ง 2 อายุมีสภาพเป็นดินกรดจัดถึงกรดปานกลาง (5.1-6.0) ซึ่งส่วนใหญ่ความเป็นกรดด่างของดินมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อยที่ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 5.6-7.3 (กรมวิชาการเกษตร, 2547) ค่าการนำไฟฟ้าของดินที่สะท้อนถึงความเค็มของดินนั้น ค่าที่วัดได้ของอ้อยทั้ง 2 อายุ (60-130 μS/cm) ไม่มีผลต่ออ้อยทั้งนี้อ้อยเป็นพืชที่อ่อนไหวต่อความเค็มปานกลาง โดยระดับความเค็มที่มีผลต่อผลผลิตอ้อยคือ 1.7 mS/cm (Lingle and Wiegand (1997) และเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับชุดดินส่วนใหญ่ (ชุดดินโคราช, สตึก, ยโสธร) ที่ใช้ปลูกอ้อยในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (110-180 μS/cm) (วีระพล และคณะ(2554)) ซึ่งอยู่ในช่วงที่ไม่เค็มถึงเค็มน้อยมากซึ่งได้จากการวัดอัตราส่วนดินต่อน้ำ 1:5 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) ปริมาณอินทรียวัตถุของดินก่อนการทดลองอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อย (1.5-2.5 %) ในทั้ง 2 อายุ

อ้อย ซึ่งโดยส่วนใหญ่พื้นที่ปลูกอ้อยในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีปริมาณอินทรียวัตถุค่อนข้างต่ำ เช่น งานวิจัยของวรรณวิภา และคณะ (2554) และของวุฒิพันธุ์ และคณะ (2557) พบว่าดินก่อนการทดลองมีอินทรียวัตถุ 0.34, 1.14 % ตามลำดับ อนุชาและคณะ (2557) และ Hussain et al. (2017) พบว่าดินก่อนการทดลองปลูกอ้อยมีอินทรียวัตถุต่ำกว่า 1 % และปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ทั้ง 2 แปลงอายุอ้อยมีปริมาณสูงกว่าเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อย (10-20 mg/kg) (กรมวิชาการเกษตร, 2547) ซึ่งปริมาณที่มีนับว่าเป็นระดับฟอสฟอรัสสูงในดิน (26-45 mg/kg) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อยทั้ง 2 แปลงที่อายุอ้อยต่างกัน ซึ่งอ้อยเป็นพืชที่ต้องการโพแทสเซียมในปริมาณมากในระดับ 80-150 mg/kg ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในระดับสูง แต่ที่พบในดินของแปลงทดลองอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง 31-60 และ 61-90 mg/kg ตามลำดับ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้พบในปริมาณที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อยทั้งสองธาตุ คือ ระดับที่เหมาะสมของแคลเซียมและแมกนีเซียม 215-487 และ 29-73 mg/kg ตามลำดับ (กรมวิชาการเกษตร, 2547)

5.3.1.2 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุอ้อยตอต่อสมบัติทางเคมีของดินหลังเก็บเกี่ยวอ้อย

ผลการทดลองใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปปุ๋ยเคมีสำเร็จรูปมาตรฐานและปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ (ปุ๋ยเปลือกหอย) ในอ้อยตอ 2 และ ตอ 3 มีผลทำให้ความเป็นกรดด่างของดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย อายุ 12 เดือน เพิ่มสูงขึ้นกว่าตัวอย่างดินก่อนการทดลองในทุกชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อยโดยยกระดับความเป็นกรดด่างของดินจากดินกรดจัดและกรดปานกลางขึ้นเป็นดินที่เป็นกรดเล็กน้อย (6.1-6.5) โดยในแปลงที่มีการให้ปุ๋ยเปลือกหอยสามารถยกระดับความเป็นกรดด่างของดินเฉลี่ยเพิ่มขึ้นมากกว่าการให้ปุ๋ยเคมี (0.66 และ 0.48 ตามลำดับ) เนื่องจากปุ๋ยทั้งสองชนิดมีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ ปุ๋ยเปลือกหอยมีสัดส่วน CaO 11.34% มากกว่าในปุ๋ยเคมีที่มี CaO 3.0% และก่อนการทดลองมีการใส่ปูน Ca 32% และ Mg 0.22% เพื่อปรับสภาพดินอัตรา 25 kg/ไร่ การเพิ่มขึ้นของความเป็นกรดด่างของดินในแปลงที่มีการใส่ปุ๋ยเปลือกหอยจะได้แคลเซียมจากทั้งสองแหล่งที่มากกว่า ซึ่งในสภาพดินที่เป็นกรดทำให้การละลายของเบสิคแคตไอออนจะเกิดได้ดี (Rajan et al., 1996) สอดคล้องกับ Ok et al. (2011) ที่ใส่เปลือกหอยนางรมบดเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินและทำให้โลหะหนักในดินเสถียรมีผลทำให้ความเป็นกรดด่างของดินเพิ่มขึ้นมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต และ Lee et al. (2008) ที่ใช้เปลือกหอยนางรมบดเป็นวัสดุปูนสามารถเพิ่มความเป็นกรดด่างของดินได้มากกว่าที่ประเมินไว้ ค่าการนำไฟฟ้าของดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย เพิ่มขึ้นในทุกชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อยเช่นเดียวกับความเป็นกรดด่างของดิน โดยการให้ปุ๋ยเคมีทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของดินเพิ่มขึ้นมากกว่าการให้ปุ๋ยเปลือกหอย (119.38 และ 72.25 µS/cm ตามลำดับ) ค่าเฉลี่ยสูงสุด (222.25 µS/cm) พบใน

แปลงที่ให้ปุ๋ยเคมีแก่อ้อยตอ 3 ยังอยู่ในเกณฑ์ที่เป็นดินเค็มน้อยมากคือ 180-350 μS/cm สำหรับดินร่วน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) ซึ่งความเค็มของดินทำให้ผลผลิตอ้อยและคุณภาพของน้ำอ้อยลดลง โดยผลผลิตอ้อยจะลดลงเมื่อดินมีความเค็มตั้งแต่ 1.7 mS/cm (Maas and Hoffman, 1977 ; Lingle and Wiegand, 1997) ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าความเค็มของดินชั้นบนที่เกิดจากการให้ปุ๋ยจำนวนมากและเป็นระยะเวลานานในการปลูกผักพื้นที่ Beijing มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 0.56 mS/cm (Chen et al., 2004)

ปริมาณอินทรียวัตถุในดินเพิ่มขึ้นในทุกชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อย โดยแปลงทดลองที่ให้ปุ๋ยเคมีมีการเพิ่มขึ้นมากกว่าแปลงที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยเล็กน้อย (0.28 และ 0.24% ตามลำดับ) โดยแปลงทดลองที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยในอ้อยตอ3 มีปริมาณอินทรียวัตถุในดินเฉลี่ยหลังเก็บเกี่ยวอ้อยสูงสุด 1.99 % และทุกแปลงมีปริมาณอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อย 1.5-2.5 % การเพิ่มขึ้นของอินทรียวัตถุเกิดจากการสะสมชีวมวลในแปลง ซึ่งการจัดการพืชมีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอินทรียวัตถุในดิน Graham et al., (2002) ได้ศึกษาผลของการจัดการวัสดุตกค้างจากอ้อย โดยเก็บเกี่ยวอ้อยสด (เศษเหลือคลุมดิน 100 %) เหลือสิ่งคลุมดิน 67 % และเก็บเกี่ยวแบบเผาอ้อยร่วมกับการจัดการปุ๋ยต่อปริมาณอินทรียวัตถุ พบว่า ปริมาณอินทรียวัตถุของดินชั้นบนเพิ่มขึ้นเมื่อมีวัสดุเหลือตกค้างมากขึ้น สอดคล้องกับ Dominy et al. (2002) ที่ศึกษาการใช้ที่ดินปลูกอ้อยเชิงเดี่ยวต่อเนื่องเป็นเวลานานจากพื้นที่ที่มีอินทรีย์คาร์บอนสูง เมื่อใช้ปลูกอ้อย 20-30 ปี และมีการเก็บเกี่ยวโดยการเผาจะทำให้อินทรีย์คาร์บอน กิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน และสมบัติทางกายภาพของดินลดลง วรรณวิภา และคณะ (2554) ศึกษารูปแบบการจัดการพืชก่อนการปลูกอ้อยก็พบว่าทุกวิธีในการปลูกพืชก่อนการปลูกอ้อยรวมทั้งปล่อยให้หญ้าขึ้นตามธรรมชาติล้วนทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สุดชลและธีรยุทธ (2558) พบว่าปริมาณอินทรียวัตถุจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามการจัดการ ด้วยวิธีไม่ใส่วัสดุปรับปรุงดินและใส่ขุยมะพร้าวทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินหลังการทดลองลดลงและเพิ่มขึ้น ตามลำดับ

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้นจากก่อนการทดลองในทุกชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อย โดยแปลงที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นมากกว่าแปลงที่ให้ปุ๋ยเคมีอย่างชัดเจน โดยเฉลี่ยอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินของทั้งสองปัจจัยเพิ่มขึ้นกว่าเดิม 100 และ 88 % ในการให้ปุ๋ยเปลือกหอย และปุ๋ยเคมี ตามลำดับ แปลงที่มีค่าเฉลี่ยของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงที่สุดคือ แปลงที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยในอ้อยตอ 3 (66.48 mg/kg) ซึ่งมีมากกว่าปริมาณที่เหมาะสมสำหรับอ้อยกว่า 3 เท่า เมื่อวิเคราะห์ดินก่อนการทดลอง พบว่ามีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มากกว่าปริมาณที่เหมาะสมสำหรับอ้อยตั้งแต่เริ่มต้น และตลอด 2 และ 3 ปีก่อนการทดลองเกษตรกรมีการให้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 มาโดยตลอด นอกจากนี้ในการทำนาก่อนการปลูก

อ้อยมีการให้ปุ๋ยนาสูตร 16-16-8 ต่อเนื่องทุกปี จึงเป็นได้ว่ามีการสะสมของฟอสฟอรัสในดิน ประกอบกับพื้นที่เป็นที่ราบไม่มีการสูญเสียหน้าดิน ทำให้โอกาสการสูญเสียลดลง (ยงยุทธ และคณะ, 2551) สอดคล้องกับ Castillo and Wright (2008) ที่พบว่าเมื่อมีการให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสระยะเวลานานต่อเนื่องทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดของดินเพิ่มขึ้น แต่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีน้อยกว่า 1 % ของฟอสฟอรัสทั้งหมด และฟอสฟอรัสในส่วนที่พืชใช้ได้ง่าย (Labile P) ก็จะเพิ่มจาก 1.3 เป็น 7.2 mg/kg ในพื้นที่ปลูกพืช และจาก 1.4 เป็น 10.7 mg/kg ในพื้นที่ทุ่งหญ้า ซึ่งการให้ฟอสฟอรัสในรูปปุ๋ยกับพืชเป็นเพียงการเติมส่วนย่อยเข้าไปในปริมาณการเก็บกักรวม (total soil pool)ของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ซึ่งยังขึ้นอยู่กับความสามารถที่จะถูกดูดใช้ของพืช Coale et al. (1993) การสะสมของฟอสฟอรัสในดินอาจก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการปนเปื้อนลงในระบบนิเวศ ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อม โดยธรรมชาติแล้วในดินจะมีปริมาณฟอสฟอรัสที่แปรผัน ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย คือ วัตถุต้นกำเนิด เนื้อดิน และการจัดการ เช่น ปริมาณและชนิดของปุ๋ยฟอสเฟตที่ใช้ และการใช้ที่ดิน (Daniel et al., 1994)

ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้หลังเก็บเกี่ยวอ้อยพบว่าในอ้อยตอ 2 มีปริมาณลดลงจากก่อนการทดลอง ส่วนในอ้อยตอ 3 มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของทุกแปลงยังต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อยซึ่งควรอยู่ที่ระดับ 80-150 mg/kg แต่แปลงทดลองมีปริมาณอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง (31-60, 61-90 mg/kg) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) การให้ปุ๋ยโพแทสเซียมที่เหมาะสมจะทำให้ผลผลิตของอ้อยทั้งปริมาณและคุณภาพสูงขึ้น เช่น Shukla et al. (2009) ได้ทดลองให้ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 21.25 kg/ไร่ (10.56 kgK/ไร่) ในระบบน้ำกับพื้นที่ที่มีระดับโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในระดับที่เหมาะสมที่ Lucknow อินเดีย ก็พบว่าสามารถเพิ่มผลผลิตอ้อยตอขึ้นได้อีก และ Graham et al., (2002) ได้ศึกษาผลของการจัดการวัสดุตกค้างจากอ้อย และการจัดการให้และไม่ให้ปุ๋ย ก็พบว่าการให้ปุ๋ยโพแทสเซียม 22.4 kgK/ไร่ และไม่ให้ มีผลปริมาณโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้และที่ไม่แลกเปลี่ยน (non-exchangeable K) ในดิน เพิ่มขึ้นทั้งสองรูปในการให้ปุ๋ย และลดลงทั้งสองรูปในกรณีที่ไม่ให้ปุ๋ย ทั้งนี้เพราะโพแทสเซียมที่สำรองไว้ (K reserves) ถูกใช้หมดไป

ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่ามีการสะสมมากกว่าก่อนการทดลองโดยเฉพาะอย่างยิ่งจากอิทธิพลของชนิดของปุ๋ย โดยในแปลงอ้อยที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอย มีการสะสมของแคลเซียมสูงกว่าก่อนการทดลองเพิ่มขึ้นกว่า 17 % ซึ่งเมื่อเทียบกับแปลงที่ให้ปุ๋ยเคมีเพิ่มขึ้นเพียง 2 % ทั้งนี้อาจเป็นเพราะองค์ประกอบของปุ๋ยเปลือกหอยที่มีแคลเซียมเป็นส่วนประกอบที่มากกว่าแคลเซียมที่มีอยู่ในปุ๋ยเคมี สอดคล้องกับ Clough (1994) ที่ทดลองให้แคลเซียมซัลเฟตก่อนการปลูกมัน

ฝรั่ง ในอัตรา 0, 14.4, 28.8 และ 43.2 kg/ไร่ พบว่าแคลเซียมในดินเพิ่มขึ้นจาก 4.9 เป็น 5.5 meq/100 g ตามอัตราปุ๋ยที่สูงขึ้นเมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิต ส่วนระหว่างอายุอ้อยทั้งสองอายุการเพิ่มขึ้นไม่แตกต่างกันมากนัก โดยในอ้อยตอ 2 เพิ่มขึ้นมากกว่าเล็กน้อย และมีปริมาณที่อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อยเช่นเดียวกับก่อนการทดลอง และปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อยพบว่ามีการเพิ่มขึ้นไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของปุ๋ยและอายุของอ้อย เมื่อพิจารณาเป็นรายแปลงกับพบว่า มีแปลงอ้อยตอ 2 ที่ให้ปุ๋ยเคมีและแปลงอ้อยตอ 3 ที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยที่มีปริมาณเฉลี่ยในดินลดลง แต่ยังอยู่ในเกณฑ์คุณภาพดินที่เหมาะสมกับการปลูกอ้อย (กรมวิชาการเกษตร, 2547) ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินจะขึ้นอยู่กับจำนวนของแมกนีเซียมที่ให้ Hossner and Doll (1970) ได้ทดลองอัตราการให้แมกนีเซียมในระดับต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปุ๋ยแมกนีเซียมแก่มันฝรั่งมากขึ้นปริมาณของแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินก็สูงมากขึ้นด้วย

5.3.1.3 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อยต่อการเจริญเติบโตของอ้อย

การเจริญเติบโตของอ้อยโดยการวัดที่ 4 และ 8 เดือน หลังจากการเก็บเกี่ยวอ้อยในเดือนธันวาคม 2558 พบว่า ความสูงของต้นอ้อยมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่างการวัดผลที่ห่างกัน 4 เดือน ในทุกแปลงทั้งชนิดของปุ๋ยและอายุอ้อย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของปุ๋ย พบว่าการให้ปุ๋ยเคมีอ้อยที่อายุ 8 เดือนสูงได้มากกว่าการให้ปุ๋ยเปลือกหอย และเมื่อพิจาณาอายุตอของอ้อยก็พบว่าอ้อยตอ 2 มีความสูงมากกว่าอ้อยตอ 3 ในการวัดความสูงทั้งสองช่วงอายุ ซึ่งสอดคล้องกับ Khonghintaisong et al. (2018) ที่ทดลองกับอ้อย 3 สายพันธุ์ต่อการขาดน้ำ พบว่า ความสูงของอ้อยเพิ่มขึ้นตามอายุการเจริญเติบโต แม้กระทั้งในสภาพที่ขาดน้ำ เส้นผ่าศูนย์กลางลำของอ้อยจะมีความแตกต่างกับความสูงของอ้อย คือ ลดลงเมื่ออ้อยมีอายุมากขึ้น ทั้งนี้จากการแบ่งระยะการเจริญเติบโตของอ้อยตอ จะแบ่งออกเป็น 4 ระยะ คือ ระยะตั้งตัว (initial) ระยะแตกกอ (tillering, crop development) ระยะย่างปล้อง (elongation, mid season) และระยะสุกแก่ (maturity, late) (เกษม, 2539 ; FAO, 1990) ในช่วงเวลาการวัดผล 4 เดือน ซึ่งอยู่ในระยะแตกกอช่วงสุดท้ายก่อนเข้าสู่ระยะย่างปล้อง ลักษณะของลำอ้อยมีปล้องที่สั้นและอวบใหญ่กาบใบยังไม่หลุดโดยธรรมชาติ ดังนั้นในการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางจะต้องลอกกาบใบก่อน ส่วนที่เวลา 8 เดือน อ้อยจะผ่านช่วงระยะย่างปล้อง ซึ่งเป็นระยะที่อ้อยมีการเจริญเติบโตสูงที่สุด ลักษณะลำอ้อยจะมีข้อปล้องที่ยืดออกจึงทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางลำอ้อยน้อยกว่าการวัดผลที่ 4 เดือน จำนวนต้นต่อไร่ของอ้อยในแปลงที่ให้ปุ๋ยและอายุอ้อยทั้งสองปัจจัยไม่ต่างมากนัก ในการวัดทั้ง 4 และ 8 เดือน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 ช่วงเวลา พบว่าจำนวนต้นเฉลี่ยของอ้อยลดลงในทุกแปลงการทดลอง โดยที่แปลงอ้อยตอ 2 ที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยมีจำนวนที่ลดลงมากกว่าแปลงอื่น สอดคล้องกับ นิพนธ์ และวรรณวิภา (2561) ที่ทดลองอัตราปุ๋ยไนโตรเจนกับอ้อยพันธุ์ขอนแก่น 3 ปลูกในดินทราย พบว่าจำนวนต้นต่อพื้นที่สูงที่สุดเมื่ออายุ

อ้อย 4 เดือน และหลังจากนั้นจำนวนต้นอ้อยจะลดลง แต่จะไม่ลดลงมากนักจนเก็บเกี่ยว ค่าความเขียวใบเฉลี่ยของอ้อยที่วัดผลในช่วง 4 เดือน ในแต่ละแปลงไม่แตกต่างกันมากนักมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 43-45 SPAD Value แต่เมื่อวัดผลในช่วง 8 เดือนกลับพบว่าค่าความเขียวใบที่วัดได้ลดลงในทุกแปลงของทั้งสองปัจจัย และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของปุ๋ยพบว่า การให้ปุ๋ยเคมีแก่อ้อยทำให้ค่าความเขียวใบอ้อยลดลงมากกว่าการให้ปุ๋ยเปลือกหอย และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอายุของอ้อยตอ พบว่าอ้อยตอ 3 มีค่าลดลงมากกว่าอ้อยตอ 2 ส่วนแปลงที่มีการลดลงของค่าความเขียวใบมากที่สุดเป็นแปลงอ้อยตอ 3 ที่ให้ปุ๋ยเคมี การที่ค่าความเขียวใบอ้อยสูงในช่วงต้นของการเจริญเติบโตอ้อยจะเพิ่มความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงและปริมาณคลอโรฟิลล์จะลดลงตามช่วงอายุของอ้อยที่มากขึ้น Inman-Bamber et al. (2011) สอดคล้องกับ บริษัท ไทยรุ่งเรืองอุตสาหกรรม จำกัด และบริษัท ดี เค ที จำกัด (2554) ที่วัดค่าความเขียวใบช่วงอายุ 3 6 และ 9 เดือน ของอ้อยพันธุ์ขอนแก่น 3 พบว่ามีค่าลดลงตามช่วงอายุอ้อยเช่นเดียวกัน

5.3.1.4 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อยต่อปริมาณธาตุอาหารพืชในใบอ้อย

การสะสมของธาตุอาหารพืชในใบอ้อยของใบที่ 3 นับจากคอใบสูงสุด (top visible dewlap) ในเดือนที่ 4 พบความแตกต่างระหว่างอายุของอ้อยเฉพาะกับไนโตรเจนทั้งหมดในใบเท่านั้น ส่วนธาตุอาหารอื่นไม่มีความแตกต่างกันกับทั้งปัจจัย ทั้งชนิดของปุ๋ยและอายุของอ้อยตอ ส่วนที่แตกต่างกันระหว่างชนิดของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยของปริมาณธาตุอาหารพืชในใบอ้อยพบเฉพาะแคลเซียมเท่านั้น และธาตุอาหารพืชอื่นไม่มีความแตกต่างกัน ปริมาณการสะสมในใบของเดือนที่ 4 ที่เป็นระยะท้ายของการแตกกอของอ้อย พบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุอาหารพืชที่สะสมในใบต่ำกว่าค่าวิกฤตของอ้อยพบเฉพาะแคลเซียมในแปลงอ้อยที่มีการให้ปุ๋ยเคมีเท่านั้น ค่าวิกฤตที่รายงานโดย Meyer (2011) คือ ไนโตรเจน 1.6-1.8 % ฟอสฟอรัส 0.17-0.19 % โพแทสเซียม 1.05 % แคลเซียม 0.15 % และแมกนีเซียม 0.08-0.12 % และในอ้อยอายุ 8 เดือนก็เป็นเช่นเดียวกัน คือ ปริมาณแคลเซียมที่สะสมในใบต่ำกว่าค่าวิกฤตในแปลงอ้อยที่ให้ปุ๋ยเคมี โดยเป็นเพราะการดูดใช้โพแทสเซียมและแมกนีเซียมของอ้อยได้มากและสะสมในใบสูงกว่าค่าวิกฤตถึง 1.43 และ 12.79 เท่า ตามลำดับ โดยการเป็นปฏิปักษ์กันของโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมในการดูดใช้ธาตุอาหารของอ้อย รายงานโดย Wood and Meyer (1986), Rhodes et al. (2018)

5.3.1.5 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุอ้อยต่อองค์ประกอบคุณภาพผลผลิตของอ้อย

การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยแก่อ้อยตอ ไม่มีผลต่อปริมาณผลผลิตอ้อยที่เกิดขึ้น ทั้งนี้การให้ปุ๋ยทั้งสองชนิด ให้ผลผลิตเฉลี่ย 19.86 และ 20.05 ตัน/ไร่ ซึ่งเป็นผลผลิตที่สูงกว่าค่าเฉลี่ยผลผลิตอ้อยของประเทศไทยมาก โดยผลผลิตเฉลี่ยของประเทศ ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และของจังหวัด

นครราชสีมาในฤดูการผลิต 2559/2560 เท่ากับ 9.43, 9.31 และ 9.05 ตัน/ไร่ ตามลำดับ (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2560) แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอายุอ้อยก็พบว่ามีความแตกต่างกันของผลผลิต โดยที่อ้อยตอ 2 มีปริมาณผลผลิตสูงกว่าอ้อยตอ 3 ถึง 2.51 ตัน/ไร่ หรือ 13.42 % ซึ่งสอดคล้องกับ Singh et al., (2007) ที่รายงานว่าอ้อยตอ 1 และตอ 2 ที่ได้รับการจัดการแบบเดียวกันในเขตกึ่งร้อนของอินเดียได้ผลผลิต 12.93 และ 11.98 t/ไร่ ตามลำดับ องค์ประกอบผลผลิตน้ำตาล ในรูปของ ค่า commercial cane sugar (ซีซีเอส, CCS) อ้อยที่ได้รับปุ๋ยต่างชนิดกันก็มีความแตกต่างของค่า CCS ไม่มากนัก คือต่างกันเฉลี่ย 0.22 CCS และเมื่อพิจารณาอายุของอ้อยตอก็พบว่าความแตกต่างของค่า CCS มีมากกว่าชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยมีค่าต่างกันเฉลี่ย 0.60 CCS ซึ่งสอดคล้องกับการวัดคุณภาพอ้อยของ Muchow et al., (1996) ที่ให้ปัจจัยการผลิตในระดับสูง เพื่อศึกษาปริมาณและความเข้มข้นของซูโครสในลำอ้อย ก็พบว่าอ้อยอ้อยปลูกได้คุณภาพขององค์ประกอบผลผลิตดีกว่าอ้อยตอ แสดงให้เห็นว่าอายุของอ้อยมีผลต่อทั้งปริมาณและคุณภาพของผลผลิตอ้อย ทำให้ส่งผลโดยตรงต่อผลผลิตน้ำตาลที่เกิดขึ้นในการทดลอง โดยมีผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 คือ 3.02 และ 2.54 ตัน/ไร่ ตามลำดับ

5.3.2 การศึกษาผลการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการปลูกอ้อยในพื้นที่ดอน (สภาพไร่)

5.3.2.1 สมบัติของดินในพื้นที่ดอน (สภาพไร่) ก่อนการการทดลอง

การใช้ประโยชน์ที่ดินเดิมก่อนการปลูกอ้อยเป็นไร่มันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวต่อเนื่องหลายปี โดยเกษตรกรให้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัม/ไร่ และเมื่อเปลี่ยนการใช้ประโยชน์จากมันสำปะหลังเป็นอ้อย ก็ยังคงให้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 ในอัตราเดิมคือ 50 กิโลกรัม/ไร่ ผลผลิตอ้อยเฉลี่ยที่เกษตรกรได้ในฤดูการผลิต 2558/2559 เท่ากับ 16 ตัน/ไร่ (ข้อมูลการสัมภาษณ์เกษตรกร) จากข้อมูลสมบัติทางเคมีของดินที่เก็บตัวอย่างดินความลึก 0-30 เซนติเมตร หลังการเก็บเกี่ยวอ้อยฤดูการผลิต 2558/2559 ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาก่อนการทดลอง พบว่า ในบริเวณพื้นที่อ้อยตอ 1 มี ค่าเฉลี่ยของความเป็นกรดด่างของดิน (1:5), ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (1:5), ปริมาณร้อยละของอินทรียวัตถุ, ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน คือ 6.11, 63.88 µS/cm , 1.65 %, 69.16, 106.77, 128.72 และ 38.85 mg/kg ตามลำดับ และในพื้นที่อ้อยตอ 2 มีค่าเท่ากับ 5.87, 76.88 µS/cm , 1.48 %, 68.80, 105.56, 135.91 และ 52.38 mg/kg ตามลำดับ โดยทั่วไปพื้นที่ปลูกอ้อยทั้ง 2 อายุมีสภาพเป็นดินกรดจัดถึงกรดเล็กน้อย (5.1-6.5) ซึ่งส่วนใหญ่ความเป็นกรดด่างของดินมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อยที่ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 5.6-7.3

(กรมวิชาการเกษตร, 2547) ค่าการนำไฟฟ้าของดินที่สะท้อนถึงความเค็มของดินนั้น ค่าที่วัดได้ของอ้อยทั้ง 2 อายุ (45-90 μS/cm) ไม่มีผลต่ออ้อยทั้งนี้อ้อยเป็นพืชที่อ่อนไหวต่อความเค็มปานกลาง โดยระดับความเค็มที่มีผลต่อผลผลิตอ้อยคือ 1.7 mS/cm (Lingle and Wiegand (1997) และเป็นค่าที่ต่ำกว่าชุดดินส่วนใหญ่ (ชุดดินโคราช, สตึก, ยโสธร) ที่ใช้ปลูกอ้อยในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (110-180 μS/cm) (วีระพล และคณะ(2554)) ซึ่งอยู่ในช่วงที่ไม่เค็มในกรณีของดินร่วนปนทรายซึ่งได้จากการวัดอัตราส่วนดินต่อน้ำ 1:5 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) ปริมาณอินทรียวัตถุของดินก่อนการทดลองอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อย (1.5-2.5 %) ในอ้อยตอ 1 ส่วนอ้อยตอ 2 ต่ำกว่าเกณฑ์เล็กน้อย ซึ่งโดยส่วนใหญ่พื้นที่ปลูกอ้อยในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีปริมาณอินทรียวัตถุค่อนข้างต่ำ เช่น งานวิจัยของวรรณวิภา และคณะ (2554) และของวุฒิพันธุ์ และคณะ (2557) พบว่าดินก่อนการทดลองมีอินทรียวัตถุเพียง 0.34, 1.14 % ตามลำดับ อนุชาและคณะ (2557) และ Hussain et al. (2017) ก็พบว่าดินก่อนการทดลองปลูกอ้อยมีอินทรียวัตถุต่ำกว่า 1 % เช่นเดียวกัน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ทั้ง 2 แปลงอายุอ้อยมีปริมาณสูงกว่าเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อย (10-20 mg/kg) (กรมวิชาการเกษตร, 2547) ซึ่งปริมาณที่มีนับว่าเป็นระดับฟอสฟอรัสสูงมากในดิน (>45 mg/kg) (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อยทั้ง 2 แปลงอายุอ้อย ซึ่งอ้อยเป็นพืชที่ต้องการโพแทสเซียมในปริมาณมาก ในระดับ 80-150 mg/kg ซึ่งถือว่าเป็นปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในระดับสูง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้พบในปริมาณที่ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อย คือ ระดับที่เหมาะสมของแคลเซียม 215-487 mg/kg และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้พบในปริมาณที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อยคือ 29-73 mg/kg ตามลำดับ (กรมวิชาการเกษตร, 2547)

5.3.2.2 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุอ้อยตอต่อสมบัติทางเคมีของดินหลังเก็บเกี่ยวอ้อย

ผลการทดลองใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในรูปปุ๋ยเคมี (ปุ๋ยเคมี) สำเร็จรูปมาตรฐานและปุ๋ยฟอสฟอรัสจากเปลือกหอยเชอรี่ (ปุ๋ยเปลือกหอย) ในอ้อยตอ 1 และ ตอ 2 มีผลทำให้ความเป็นกรดด่างของดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย อายุ 12 เดือน เพิ่มสูงขึ้นกว่าตัวอย่างดินก่อนการทดลองในทุกชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อยโดยยกระดับความเป็นกรดด่างของดินจากดินกรดจัดและกรดเล็กน้อยขึ้นสูงกว่าก่อนการทดลองเป็นดินที่เป็นกรดปานกลางถึงกรดเล็กน้อย (5.6-6.5) โดยในแปลงที่มีการให้ปุ๋ยเคมีสามารถเพิ่มความเป็นกรดด่างของดินเฉลี่ยได้มากกว่าการให้ปุ๋ยเปลือกหอย (0.26 และ 0.18 ตามลำดับ) และก่อนการทดลองมีการใส่ปูน (Ca 32%, Mg 0.22%) เพื่อปรับสภาพดินอัตรา 25 kg/ไร่ ค่าการนำไฟฟ้าของดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย เพิ่มขึ้นในทุกชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อยเช่นเดียวกับความเป็นกรดด่างของดิน โดยการให้ปุ๋ยทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันคือ 60.63 และ 62.13 μS/cm ในแปลงปุ๋ยเคมีและปุ๋ย

เปลือกหอย ตามลำดับ โดยค่าเฉลี่ยสูงสุด 151.50 µS/cm ที่พบในแปลงที่ให้ปุ๋ยเคมีในการปลูกอ้อยตอ 2 เกินกว่าดินที่จัดอยู่ในเกณฑ์ที่เป็นดินเค็มน้อยมากคือ มากกว่า 150 µS/cm เพียงเล็กน้อยเท่านั้น สำหรับดินร่วนปนทราย (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) ซึ่งความเค็มของดินจะทำให้ผลผลิตอ้อยและคุณภาพของน้ำอ้อยลดลง โดยผลผลิตอ้อยจะลดลงเมื่อดินมีความเค็มตั้งแต่ 1.7 mS/cm (Maas and Hoffman, 1977 ; Lingle and Wiegand, 1997) ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าความเค็มของดินชั้นบนที่เกิดจากการใช้ปุ๋ยจำนวนมากและเป็นระยะเวลานานในการปลูกผักพื้นที่ Beijing มีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่ม 0.56 mS/cm (Chen et al., 2004)

ปริมาณอินทรียวัตถุในดินเพิ่มขึ้นในชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อย ยกเว้นอ้อยตอ 2 ที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยมีค่าเท่าก่อนการทดลอง โดยแปลงทดลองที่ให้ปุ๋ยเคมีมีการเพิ่มขึ้นมากกว่าแปลงที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอย (0.34 และ 0.20% ตามลำดับ) โดยแปลงทดลองที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยในอ้อยตอ 1 มีปริมาณอินทรียวัตถุในดินเฉลี่ยหลังเก็บเกี่ยวอ้อยสูงสุด (2.07 %) และทุกแปลงมีปริมาณอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อย (1.5-2.5 %) การเพิ่มขึ้นของอินทรียวัตถุเกิดจากการสะสมชีวมวลในแปลง การจัดการพืชมีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอินทรียวัตถุในดิน Graham et al., (2002) ได้ศึกษาผลการจัดการวัสดุตกค้างจากอ้อย คือ เก็บเกี่ยวอ้อยสด (เศษเหลือคลุมดิน 100 %) เหลือสิ่งคลุมดิน 67 % และเก็บเกี่ยวแบบเผาอ้อยร่วมกับการจัดการปุ๋ยต่อปริมาณอินทรียวัตถุ พบว่า ปริมาณอินทรียวัตถุของดินชั้นบนเพิ่มขึ้นเมื่อเหลือวัสดุตกค้างมากขึ้น สอดคล้องกับ Dominy et al. (2002) ที่ศึกษาการใช้ที่ดินปลูกอ้อยเชิงเดี่ยวต่อเนื่องเป็นเวลานานจากพื้นที่ที่มีอินทรีย์คาร์บอนสูง เมื่อใช้ปลูกอ้อย 20-30 ปี และมีการเก็บเกี่ยวโดยการเผาจะทำให้อินทรีย์คาร์บอน กิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน และสมบัติทางกายภาพของดินลดลง วรรณวิภา และคณะ (2554) ศึกษารูปแบบการจัดการพืชก่อนการปลูกอ้อยก็พบว่าทุกวิธีในการปลูกพืชก่อนการปลูกอ้อยรวมทั้งปล่อยให้หญ้าขึ้นตามธรรมชาติล้วนทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สุดชลและธีรยุทธ (2558) พบว่าปริมาณอินทรียวัตถุจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามการจัดการ โดยวิธีไม่ใส่วัสดุปรับปรุงดินและใส่ขุยมะพร้าวทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินหลังการทดลองลดลงและเพิ่มขึ้น ตามลำดับ

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้นจากก่อนการทดลองในทุกชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อย โดยแปลงที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยมีการเพิ่มขึ้นมากกว่าแปลงที่ให้ปุ๋ยเคมีอย่างชัดเจน แปลงที่มีค่าเฉลี่ยของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงที่สุดคือการให้ปุ๋ยเปลือกหอยในอ้อยตอ 2 (108.80 mg/kg) ซึ่งมีเกินกว่าปริมาณที่เหมาะสมสำหรับอ้อยกว่า 5 เท่า และเมื่อพิจารณาค่าวิเคราะห์ดินก่อนการทดลองก็พบว่าดินมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มากกว่าปริมาณที่เหมาะสมสำหรับอ้อยตั้งแต่เริ่มต้นแล้ว และก่อนการทดลองเกษตรกรก็ให้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 มาโดยตลอดต่อเนื่องทุกปี จึงเป็นได้ว่า

มีการสะสมของฟอสฟอรัสในดิน ประกอบกับพื้นที่เป็นที่ลาดเอียงไม่มาก การสูญเสียหน้าดินน้อยมาก ทำให้โอกาสการสูญเสียลดลง (ยงยุทธ และคณะ, 2551) สอดคล้องกับ Castillo and Wright (2008) ที่พบว่าเมื่อมีการให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสระยะเวลานานต่อเนื่องทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดของดินเพิ่มขึ้น แต่ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีน้อยกว่า 1 % ของฟอสฟอรัสทั้งหมด และฟอสฟอรัสในส่วนที่พืชใช้ได้ง่าย (labile P) ก็จะเพิ่มจาก 1.3 เป็น 7.2 mg/kg ในพื้นที่ปลูกพืช และจาก 1.4 เป็น 10.7 mg/kg ในพื้นที่ทุ่งหญ้า ซึ่งการให้ฟอสฟอรัสในรูปปุ๋ยกับพืชเป็นเพียงการเติมส่วนย่อยเข้าไปในปริมาณการเก็บกักรวม (total soil pool)ของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ซึ่งยังต้องขึ้นอยู่กับความสามารถที่จะถูกดูดใช้ของพืช Coale et al. (1993) การสะสมของฟอสฟอรัสในดินก่อให้เกิดความกังวลเกี่ยวกับการปนเปื้อนลงในระบบนิเวศ ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อม โดยธรรมชาติแล้วในดินจะมีปริมาณฟอสฟอรัสที่แปรผันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย คือ วัตถุต้นกำเนิด เนื้อดิน และการจัดการ เช่น ปริมาณและชนิดของปุ๋ยฟอสเฟตที่ใช้ และการใช้ที่ดิน (Daniel et al., 1994)

ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้หลังเก็บเกี่ยวอ้อยพบว่าในอ้อยตอทุกแปลงทั้งชนิดปุ๋ยและอายุอ้อยตอมีปริมาณลดลงจากก่อนการทดลอง ซึ่งปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ของทุกแปลงยังอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อยที่ระดับ 80-150 mg/kg (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) การให้ปุ๋ยโพแทสเซียมที่เหมาะสมจะทำให้ผลผลิตของอ้อยทั้งปริมาณและคุณภาพสูงขึ้น เช่น Shukla et al. (2009) ได้ทดลองให้ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ 21.25 kg/ไร่ (10.56 kgK/ไร่) ในระบบน้ำกับพื้นที่ที่มีระดับโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในระดับที่เหมาะสมที่ Lucknow อินเดีย ก็พบว่าสามารถเพิ่มผลผลิตอ้อยตอขึ้นได้อีก และ Graham et al., (2002) ได้ศึกษาผลของการจัดการวัสดุตกค้างจากอ้อย และการจัดการให้และไม่ให้ปุ๋ย ก็พบว่าการให้ปุ๋ยโพแทสเซียม 22.4 kgK/ha และไม่ให้ มีผลปริมาณโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้และที่ไม่แลกเปลี่ยน (non-exchangeable K) ในดิน เพิ่มขึ้นทั้งสองรูปในการให้ปุ๋ย และลดลงทั้งสองรูปในกรณีที่ไม่ให้ปุ๋ย ทั้งนี้เพราะโพแทสเซียมที่สำรองไว้ (K reserves) ถูกใช้หมดไป

ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่ามีการสะสมเพิ่มสูงขึ้นกว่าก่อนการทดลองโดยเฉพาะอย่างยิ่งจากอิทธิพลของชนิดของปุ๋ย โดยในแปลงอ้อยที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอย มีการสะสมของแคลเซียมสูงกว่าก่อนการทดลองเพิ่มขึ้นกว่า 15 % ซึ่งเมื่อเทียบกับแปลงที่ให้ปุ๋ยเคมีเพิ่มขึ้นเพียง 6 % ทั้งนี้อาจเป็นเพราะองค์ประกอบของปุ๋ยเปลือกหอยที่มีแคลเซียมเป็นส่วนประกอบที่มากกว่าแคลเซียมที่มีอยู่ในปุ๋ยเคมี สอดคล้องกับ Clough (1994) ที่ทดลองการให้แคลเซียมซัลเฟตก่อนการปลูกมันฝรั่ง อัตรา 0, 14.4, 28.8 และ 43.2 kg/ไร่ พบว่าแคลเซียมในดินเพิ่มขึ้นจาก 4.9 เป็น 5.5 meq/100 g ตามอัตราปุ๋ยที่สูงขึ้นเมื่อเก็บเกี่ยวผลผลิต ส่วนระหว่างอายุอ้อยทั้งสองอายุการเพิ่มขึ้นไม่

แตกต่างกันมากนักในแปลงที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอย (16 % (อ้อยตอ 1) และ 14 % (อ้อยตอ 2)) แต่ในแปลงที่ให้ปุ๋ยเคมีแตกต่างกันมาก คือ ร้อยละ 11 และร้อยละ 1 ในอ้อยตอ 1 และตอ 2 ตามลำดับ และมีปริมาณที่ยังต่ำกว่าเกณฑ์ที่เหมาะสมแก่การปลูกอ้อยเช่นเดียวกับก่อนการทดลอง และปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อย พบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นในทุกแปลงทั้งชนิดของปุ๋ยและอายุของอ้อย เมื่อพิจารณาเป็นรายแปลงพบว่า มีแปลงอ้อยตอ 2 ที่ให้ปุ๋ยเคมีมีปริมาณเกือบจะไม่เพิ่มขึ้น (จาก 47.76 เป็น 47.77 mg/kg) โดยทั้งหมดยังอยู่ในเกณฑ์คุณภาพดินที่เหมาะสมกับการปลูกอ้อย (กรมวิชาการเกษตร, 2547) ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินก็จะขึ้นอยู่กับจำนวนของแมกนีเซียมที่ให้ Hossner and Doll (1970) ได้ทดลองอัตราการให้แมกนีเซียมในระดับต่างๆ ก็พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปุ๋ยแมกนีเซียมแก่มันฝรั่งมากขึ้น ปริมาณของแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินก็เพิ่มมากขึ้นด้วย

5.3.2.3 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อยต่อการเจริญเติบโตของอ้อย

การเจริญเติบโตของอ้อยโดยการวัดที่ 4 และ 8 เดือน หลังจากการเก็บเกี่ยวอ้อยในเดือนธันวาคม 2558 พบว่า ความสูงของต้นอ้อยมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่างการวัดผลที่ห่างกัน 4 เดือน ในทุกแปลงทั้งชนิดของปุ๋ยและอายุอ้อย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของปุ๋ยพบว่าการให้ปุ๋ยเคมีอ้อยที่อายุ 8 เดือนสูงได้มากกว่าการให้ปุ๋ยเปลือกหอย และเมื่อพิจาณาอายุตอของอ้อยก็พบว่าอ้อยตอ 2 มีความสูงมากกว่าอ้อยตอ 1 ในการวัดความสูงทั้งสองช่วงอายุ ซึ่งสอดคล้องกับ Khonghintaisong et al. (2018) ที่ทดลองกับอ้อย 3 สายพันธุ์ต่อการขาดน้ำ พบว่า ความสูงของอ้อยเพิ่มขึ้นตามอายุการเจริญเติบโต แม้กระทั่งในสภาพที่ขาดน้ำ เส้นผ่าศูนย์กลางลำของอ้อยจะมีความแตกต่างกับความสูงของอ้อย คือ ลดลงเมื่ออ้อยมีอายุมากขึ้น ทั้งนี้จากการแบ่งระยะการเจริญเติบโตของอ้อยตอ จะแบ่งออกเป็น 4 ระยะ คือ ระยะตั้งตัว (initial) ระยะแตกกอ (tillering, crop development) ระยะย่างปล้อง (elongation, mid season) และระยะสุกแก่ (maturity, late) (เกษม, 2539 ; FAO, 1990) ในช่วงเวลาการวัดผล 4 เดือน ซึ่งอยู่ในระยะแตกกอช่วงสุดท้ายก่อนเข้าสู่ระยะย่างปล้อง ลักษณะของลำอ้อยมีปล้องที่สั้นและอวบใหญ่กาบใบยังไม่หลุดโดยธรรมชาติ ดังนั้นในการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางจะต้องลอกกาบใบก่อน ส่วนที่เวลา 8 เดือน อ้อยจะผ่านช่วงระยะย่างปล้อง ซึ่งเป็นระยะที่อ้อยมีการเจริญเติบโตสูงที่สุด ลักษณะลำอ้อยจะมีข้อปล้องที่ยืดออกจึงทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางลำอ้อยน้อยกว่าการวัดผลที่ 4 เดือน จำนวนต้นต่อไร่ของอ้อยในแปลงที่ให้ปุ๋ยและอายุอ้อยทั้งสองปัจจัยไม่ต่างกันมาก ในการบันทึกที่อายุอ้อย 4 เดือน ส่วนเมื่ออายุอ้อย 8 เดือน การให้ชนิดของปุ๋ยต่างกันจะทำให้จำนวนต้นต่อไร่แตกต่างกัน แต่ลักษณะนี้จะไม่เกิดขึ้นกับอายุของอ้อยและเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 ช่วงเวลา พบว่าจำนวนต้นเฉลี่ยของอ้อยลดลงในทุกแปลงการทดลองเมื่ออายุอ้อยเพิ่มขึ้น โดยที่แปลงในอ้อยตอ 2 ที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยพบว่ามีจำนวนต้นต่อไร่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่อ้อยตอ 2 ที่ให้ปุ๋ยเคมีมีจำนวนลดลงมากกว่าแปลงอื่น สอดคล้องกับ นิพนธ์ และวรรณวิภา (2561) ที่

ทดลองอัตราปุ๋ยไนโตรเจนกับอ้อยพันธุ์ขอนแก่น 3 ปลูกในดินทราย พบว่าจำนวนต้นต่อพื้นที่สูงที่สุด เมื่ออายุอ้อย 4 เดือน และหลังจากนั้นจำนวนต้นอ้อยจะลดลง แต่จะไม่ลดลงมากนักจนเก็บเกี่ยว ค่าความเขียวใบเฉลี่ยของอ้อยที่วัดผลในช่วง 4 เดือน ในแต่ละแปลงไม่แตกต่างกันมากนักมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 42-48 SPAD Value แต่เมื่อวัดผลในช่วง 8 เดือนกลับพบว่าค่าความเขียวใบที่วัดได้ลดลงในทุกแปลงของทั้งสองปัจจัย เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของปุ๋ยพบว่า การให้ปุ๋ยเปลือกหอยแก่อ้อยทำให้ค่าความเขียวใบอ้อยลดลงมากกว่าการให้ปุ๋ยเคมี ส่วนระหว่างอายุของตออ้อยก็พบว่าอ้อยตอ 1 ลดลงมากกว่าอ้อยตอ 2 ส่วนแปลงที่มีการลดลงของค่าความเขียวใบมากที่สุดเป็นแปลงอ้อยตอ 1 ที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอย การที่ค่าความเขียวใบอ้อยสูงในช่วงต้นของการเจริญเติบโตอ้อยจะเพิ่มความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงและปริมาณคลอโรฟิลล์จะลดลงตามช่วงอายุของอ้อยที่มากขึ้น Inman-Bamber et al. (2011) สอดคล้องกับ บริษัท ไทยรุ่งเรืองอุตสาหกรรม จำกัด และบริษัท ดี เค ที จำกัด (2554) ที่วัดค่าความเขียวใบช่วงอายุ 3, 6 และ 9 เดือน ของอ้อยพันธุ์ขอนแก่น 3 พบว่ามีค่าลดลงตามช่วงอายุอ้อยเช่นเดียวกัน

5.3.2.4 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อยต่อปริมาณธาตุอาหารพืชในใบอ้อย

การสะสมของธาตุอาหารพืชในใบอ้อยของใบที่ 3 นับจากคอใบสูงสุด (top visible dewlap) ในเดือนที่ 4 และเดือนที่ 8 พบความแตกต่างระหว่างชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อยตอเฉพาะกับแคลเซียมทั้งหมดในใบเท่านั้น ส่วนธาตุอาหารอื่นไม่มีความแตกต่างกันกับทั้งปัจจัยทั้งสองคือ ทั้งชนิดของปุ๋ยและอายุของอ้อยตอ จากปริมาณการสะสมในใบของเดือนที่ 4 ที่เป็นระยะท้ายของการแตกกอของอ้อยพบว่า ค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุอาหารพืชที่สะสมในใบต่ำกว่าค่าวิกฤตของอ้อยพบเฉพาะแคลเซียมในแปลงอ้อยที่มีการให้ปุ๋ยเคมีเท่านั้น (0.12-0.13) โดยค่าวิกฤตที่รายงานโดย Meyer (2011) คือ ไนโตรเจน 1.6-1.8 % ฟอสฟอรัส 0.17-0.19 % โพแทสเซียม 1.05 % แคลเซียม 0.15 % และแมกนีเซียม 0.08-0.12 % และในอ้อยอายุ 8 เดือนก็เป็นเช่นเดียวกัน คือ ปริมาณแคลเซียมที่สะสมในใบต่ำกว่าค่าวิกฤตในแปลงอ้อยที่ให้ปุ๋ยเคมี (0.11-0.13) เป็นเพราะการดูดใช้โพแทสเซียมและแมกนีเซียมของอ้อยได้มากและสะสมในใบสูงกว่าค่าวิกฤตถึง 1.36 และ 13.26 เท่า ตามลำดับ โดยการเป็นปฏิปักษ์กันของโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมในการดูดใช้ธาตุอาหารของอ้อย รายงานโดย Wood and Meyer (1986), Rhodes et al. (2018) โดยเฉพาะอย่างยิ่งแมกนีเซียมที่พบว่าสูงกว่าค่าวิกฤตมากทำให้มีผลต่อแคลเซียมในอ้อยเป็นอย่างมาก

5.3.2.5 ผลของชนิดของปุ๋ยและอายุอ้อยต่อองค์ประกอบคุณภาพผลผลิตของอ้อย

การให้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยเปลือกหอยแก่อ้อยตอ ไม่มีผลต่อปริมาณผลผลิตอ้อยที่เกิดขึ้น ทั้งนี้การให้ปุ๋ยทั้งสองชนิด ให้ผลผลิตเฉลี่ย 20.67 และ 20.71 ตัน/ไร่ ซึ่งเป็นผลผลิตที่สูงกว่าค่าเฉลี่ยผลผลิตอ้อย

ของประเทศไทยมาก โดยผลผลิตเฉลี่ยของประเทศ ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และของจังหวัดนครราชสีมาในฤดูการผลิต 2559/2560 เท่ากับ 9.43, 9.31 และ 9.05 ตัน/ไร่ ตามลำดับ (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2560) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอายุอ้อยพบว่ามีความแตกต่างกันของผลผลิต โดยที่อ้อยตอ 1 มีปริมาณผลผลิตสูงกว่าอ้อยตอ 2 ไม่มากนัก (0.91 ตัน/ไร่ หรือ 4.50 %) ซึ่งสอดคล้องกับ Singh et al., (2007) ที่รายงานว่าอ้อยตอ 1 และตอ 2 ที่ได้รับการจัดการแบบเดียวกันในเขตกึ่งร้อนของอินเดียได้ผลผลิต 12.93 และ 11.98 t/ไร่ ตามลำดับ องค์ประกอบผลผลิตน้ำตาล ในรูปของ ค่าซีซีเอส (CCS) อ้อยที่ได้รับปุ๋ยต่างชนิดกันก็มีความแตกต่างของค่า CCS ต่างกันเฉลี่ย 0.56 CCS และเมื่อพิจารณาอายุของอ้อยตอก็พบว่าความแตกต่างของค่า CCS ไม่มากนัก และมีค่าแตกต่างกันน้อยกว่าชนิดของปุ๋ยที่ให้กับอ้อย โดยมีค่าต่างกันเฉลี่ย 0.23 CCS ซึ่งสอดคล้องกับการวัดคุณภาพอ้อยของ Muchow et al., (1996) ที่ให้ปัจจัยการผลิตในระดับสูง เพื่อศึกษาปริมาณและความเข้มข้นของซูโครสในลำอ้อย ก็พบว่าอ้อยอ้อยปลูกได้คุณภาพขององค์ประกอบผลผลิตดีกว่าอ้อยตอ แสดงให้เห็นว่าอายุของอ้อยมีผลต่อทั้งปริมาณและคุณภาพของผลผลิตอ้อย ทำให้ส่งผลโดยตรงต่อผลผลิตน้ำตาลที่เกิดขึ้นในการทดลอง โดยมีผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างอ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 คือ 3.02 และ 2.54 ตัน/ไร่ ตามลำดับ

5.4 ต้นทุนการผลิต และผลตอบแทนจากการปลูกอ้อย

ค่าลงทุนที่เกิดขึ้นจากการผลิตอ้อยจะประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการบำรุง ดูแลรักษาอ้อยตอประกอบด้วย ค่าแรงงาน ค่าวัสดุสารเคมี ค่าจ้างเครื่องจักรกลการเกษตร ค่าระบบการให้น้ำ ค่าพลังงานและค่าเก็บเกี่ยวและขนส่ง ค่าใช้จ่ายดังกล่าวที่เกิดขึ้นคิดเป็น ค่าใช้จ่ายในการปลูกอ้อยต่อไร่ โดยในการปลูกอ้อยตอค่าลงทุนในแต่ละพื้นที่จะเท่ากันได้แก่ ค่าแรงงาน ค่าจ้างเครื่องจักรกลการเกษตร ค่าระบบการให้น้ำ ค่าพลังงาน และค่าวัสดุสารเคมีเฉพาะค่ายากำจัดวัชพืช ส่วนค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกันประกอบ 2 อย่าง คือ ค่าเก็บเกี่ยวและขนส่ง และค่าปุ๋ย โดยค่าเก็บเกี่ยวและขนส่งเป็นค่าใช้จ่ายที่กำหนดโดยโรงงานน้ำตาลที่เกษตรกรมีพันธะสัญญาจะส่งอ้อยให้ ในปีการผลิต 2559/2560 โรงงานน้ำตาลครบุรีกำหนดราคาค่าเก็บเกี่ยวและขนส่ง 350 บาท/ต้นอ้อย ดังนั้นค่าลงทุนส่วนนี้จึงขึ้นอยู่กับน้ำหนักผลผลิตต่อไร่ และค่าปุ๋ยที่ต่างกันคือ กำหนดให้ใช้ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 ราคา 16.20 บาท/กิโลกรัม (1,620 บาท/ไร่) และปุ๋ยเปลือกหอยที่มีปริมาณธาตุอาหารเท่ากับปุ๋ยเคมี ราคา 14.30 บาท/กิโลกรัม แต่ใช้เพียง 85 กิโลกรัม/ไร่ (1,215.44 บาท/ไร่) การปลูกอ้อยค่าลงทุนส่วนใหญ่ คือ ค่าเก็บเกี่ยวและขนส่ง ระบบการให้น้ำ และค่าปุ๋ย ตามลำดับ เมื่อแบ่งค่าลงทุนเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นคงที่ คือ ค่าแรงงาน ค่าวัสดุสารเคมี ค่าจ้างเครื่องจักรกลการเกษตร ค่าระบบการให้น้ำ ค่าพลังงาน การผลิตอ้อยโดยให้ปุ๋ยเปลือกหอยจะมีค่าลงทุนส่วนนี้ต่ำกว่าการให้ปุ๋ยเคมี เท่ากับ 404.56 บาท/ไร่ และส่วนที่สองเป็นค่าลงทุนผัน

แปร คือ ค่าเก็บเกี่ยวและขนส่ง ก็พบว่าแปลงที่มีการให้ปุ๋ยเปลือกหอยจะมีค่าใช้จ่ายส่วนนี้สูงกว่ามีผลผลิตต่อไร่มากกว่าแปลงที่ให้ปุ๋ยเคมี แต่เมื่อรวมเป็นค่าใช้จ่ายสุทธิกลับพบว่าแปลงอ้อยตอที่ให้ปุ๋ยเคมีมีค่าลงทุนในการผลิตอ้อยตอสูงกว่าการให้ปุ๋ยเปลือกหอย

ค่าตอบแทนที่ได้จากการขายผลผลิตอ้อย แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นรายรับจากการขายอ้อยสดที่คิดตามราคาอ้อยขั้นต้นที่เกษตรกรได้รับจากการขายผลผลิตเป็นจำนวนตามน้ำหนักอ้อยสดในฤดูการผลิต 2559/2560 ราคาอ้อยขั้นต้นเท่ากับ 1,083.86 บาทต่อตันอ้อย ณ ระดับความหวานที่ 10 CCS และในส่วนที่ 2 เป็นรายรับจากผลตอบแทนที่ได้จากคุณภาพอ้อย คิดจากอัตราขึ้น-ลงของราคาอ้อยต่อ 1 หน่วย CCS ต่อเมตริกตัน โดยในฤดูการผลิตปี 2559/2560 กำหนดอัตราขึ้นลงเท่ากับ 65.03 บาท ต่อ 1 หน่วย CCS ต่อเมตริกตัน โดยวิเคราะห์เป็นผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ในรูปของผลตอบแทนต่อค่าลงทุน (B/C ratio) จะเห็นได้ว่าอ้อยที่อายุตอน้อยกว่าได้ผลผลตอบแทนสูงกว่าอ้อยที่อายุตอมากกว่า เช่น การปลูกอ้อยในพื้นที่ลุ่มอ้อยตอ 2 ได้ผลตอบแทนเฉลี่ยสูงกว่าอ้อยตอ 3 และชนิดของปุ๋ยมีผลต่อผลตอบแทนที่ได้จากการปลูกอ้อย ทั้งนี้ราคาปุ๋ยเปลือกหอยมีต้นทุนต่ำกว่าปุ๋ยเคมี ทำให้แปลงที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอยได้ผลตอบแทนสูงกว่าการให้ปุ๋ยเคมีในทั้ง 2 อายุอ้อย และเมื่อพิจารณาทั้งวิธีการให้ปุ๋ยและอายุของอ้อย ก็พบว่า อ้อยตอ 2 ที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอย ได้ผลตอบแทนและกำไรเฉลี่ยจากการปลูกอ้อยสูงที่สุด คือ 28,864.82 และ 16,990.42 บาท/ไร่ ตามลำดับ และเป็นในแนวทางเดียวกันค่า B/C ratio ของการปลูกอ้อยในทุกแปลงทั้งปัจจัยของชนิดของปุ๋ยและอายุตออ้อยมีค่ามากกว่า 1.00 นั้นหมายความว่า ผลผลตอบแทนที่ได้จากการปลูกอ้อยมากกว่าค่าลงทุนที่เกิดขึ้น ซึ่งก็คือการทำอาชีพเกษตรกรรมด้วยการปลูกอ้อยมีความคุ้มค่าต่อการลงทุน โดยในแปลงอ้อยตอ 2 ที่ให้ปุ๋ยเปลือกหอย ได้ B/C ratio จากการปลูกอ้อยสูงที่สุด คือ 2.43 รองลงมาเป็นอ้อยตอ 2 ให้ปุ๋ยเคมี อ้อยตอ 3 ให้ปุ๋ยเปลือกหอย และอ้อยตอ 3 ให้ปุ๋ยเคมี คือ 2.34, 2.27 และ 2.14 ตามลำดับ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีอย่างง่าย

การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยกระบวนการอย่างง่าย มีวิธีการไม่ซับซ้อน สามารถดัดแปลงให้เกษตรกรทำได้ ผลผลิตที่สังเคราะห์ได้มีสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตอยู่ในรูปโมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรท (monocalcium phosphate monohydrate; $Ca(H_2PO_4)_2{\bullet}H_2O$ (MCPM)) ที่มีลักษณะเป็นผง มีองค์ประกอบที่สามารถใช้เป็นธาตุอาหารในการปลูกอ้อยได้ โดยมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 55.91 % นอกจากนี้ยังมีแคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม ซิลิกา กำมะถัน ทองแดง และเหล็ก เป็นองค์ประกอบในเปลือกหอยเชอรี่ 17.00, 0.54, 0.31, 0.27, 0.11, 0.09 และ 0.08 % ตามลำดับ ความบริสุทธิ์ที่เตรียมได้ 98.54 % และมีความสามารถในการละลายได้ 91.42 % ปริมาณธาตุอาหารพืชที่สามารถใช้ได้ใกล้เคียงกับปุ๋ยทริบเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (triple superphosphate) โดยมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มากกว่า 5 %

6.2 การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ด้วยวิธีอนุภาคขนาดเล็ก

การสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่ที่บดให้ได้อนุภาคขนาดเล็ก แล้วนำมาผ่านกระบวนการสังเคราะห์ให้ได้สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต ในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟตไดไฮเดรท (dicalcium phosphate dihydrate; $Ca(HPO_4)_2{\bullet}1.9H_2O$ (DPD)) ที่มีลักษณะเป็นผง มีองค์ประกอบที่สามารถใช้เป็นธาตุอาหารในการปลูกอ้อยได้ โดยมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 28.32 % และมีความสามารถในการละลายได้ 74.02 % ปริมาณธาตุอาหารพืชที่สามารถใช้ได้ใกล้เคียงกับปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟตธรรมดา (ordinary superphosphate) โดยมีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์มากกว่า 8 % และมีองค์ประกอบเป็นธาตุอาหารพืชอื่นที่เป็นส่วนประกอบในเปลือกหอยเชอรี่ด้วย DPD ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า MCPM การจะถูกละลายด้วยสมบัติต่างๆ ของดินจะมีขึ้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสให้เพิ่มขึ้น

6.3 การใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีในการปลูกอ้อย

ผลผลิตที่ได้จากการปลูกอ้อยที่มีการให้ปุ๋ยเคมี และปุ๋ยเปลือกหอยที่ได้จากการสังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ไม่มีความแตกต่างกันทั้งในด้านปริมาณผลผลิตและคุณภาพของอ้อยที่วัดเป็น commercial cane sugar (CCS) โดยการให้ปุ๋ยกับอ้อยที่มีปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมด (N) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (P_2O_5) และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (K_2O) เท่ากับ 15, 15 และ 15 kg/ไร่ (ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 100 kg/ไร่) ด้วยปุ๋ยเคมีมาตรฐานที่มีจำหน่ายทั่วไป มีต้นทุนค่าปุ๋ย 16.20 บาท/kg (1,620 บาท/ไร่) หรือปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ นำมาผสมกับปุ๋ยยูเรีย และโพแทสเซียมคลอไรด์ ให้ได้สูตรปุ๋ยเดียวกันแต่มีน้ำหนักที่น้อยกว่าคือ 85 กิโลกรัม มีต้นทุนค่าปุ๋ย 14.30 บาท/kg (1,215.44 บาท/ไร่) จะได้ผลผลิตอ้อยตอ 1 เท่ากับ 20.7-21.58 ตัน/ไร่ อ้อยตอ 2 เท่ากับ 19.83-21.25 ตัน/ไร่ อ้อยตอ 3 เท่ากับ 18.56-18.84 ตัน/ไร่ อายุของอ้อยตอที่มากขึ้นทำให้ผลผลิตและคุณภาพผลผลิตลดลง โดยอ้อยตอ 1 อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 มีคุณภาพของอ้อยเป็นค่า CCS เฉลี่ย 14.20 14.09 และ 13.63 CCS ตามลำดับ ผลตอบแทนที่ได้จากการปลูกอ้อยต่างกันคือ กำไรที่ได้จากการปลูกอ้อยตอ 1, อ้อยตอ 2, และอ้อยตอ 3 เฉลี่ยเท่ากับ 17,793.69, 16,660.14 และ 13,474.74 บาท/ไร่ อัตราผลตอบแทนต่อค่าลงทุน (B/C ratio) ในการปลูกอ้อยตอ 1 อ้อยตอ 2 และอ้อยตอ 3 เฉลี่ยเท่ากับ 2.64, 2.48 และ 2.21 ตามลำดับ

ดังนั้นการใช้ปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่ สามารถใช้ทดแทนฟอสฟอรัสในปุ๋ยเคมีได้ โดยไม่ทำให้ปริมาณผลผลิตและคุณภาพของอ้อยลดลง และยังได้แคลเซียมที่เป็นองค์ประกอบในเปลือกหอยเป็นธาตุอาหารพืชมากกว่าการให้ปุ๋ยเคมี แคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์เป็นปุ๋ยนี้เหมาะสมกับดินที่มีปฏิกิริยาเป็นกรด เพราะทำให้การละลายได้ของฟอสฟอรัสสูงขึ้น แต่ในดินด่างที่มีปริมาณแคลเซียมสูงอยู่แล้วจะไม่เหมาะสมกับการใช้ปุ๋ยชนิดนี้ การเตรียมปุ๋ยสามารถทำได้โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ซับซ้อน สามารถใช้อุปกรณ์การเกษตรที่เกษตรกรมีอยู่มาใช้ในการเตรียมปุ๋ยได้ โดยที่เกษตรกรจะต้องทำความเข้าใจในขั้นตอนและวิธีการเตรียมปุ๋ยจากเปลือกหอยเชอรี่ที่ถูกต้อง และมีการเตรียมปุ๋ยนี้ก่อนการนำไปใช้งานอย่างน้อย 1 วัน การนำไปใช้งานมีข้อจำกัดคือ ลักษณะของปุ๋ยที่สังเคราะห์ได้จากวิธีการนี้มีลักษณะเป็นผงที่ร่วน ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้กับเครื่องหว่านปุ๋ยได้ จะต้องนำไปปั้นเม็ดก่อนถ้าหากจะให้ปุ๋ยกับอ้อยโดยการใช้กับเครื่องมือหว่านปุ๋ย ปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยเชอรี่สามารถนำไปใช้เป็นแม่ปุ๋ยฟอสเฟตที่มีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูง สามารถนำไปผสมเป็นปุ๋ยสูตรต่าง ๆ ตามความต้องการของผู้ใช้ การเตรียมปุ๋ยแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่นี้จะมีต้นทุนต่ำลงหากเตรียมในปริมาณมาก ซึ่งจะทำ

ให้มีต้นทุนของวัตถุดิบ คือ เปลือกหอยและกรดฟอสฟอริกที่ต่ำลง และเวลาที่ใช้ในการเตรียมปุ๋ยต่อตันผลิตจะลดลงด้วย ดังนั้นหากเกษตรกรรวมกลุ่มกันเพื่อผลิตเป็นปริมาณมาก และมีการผสมเป็นปุ๋ยสูตรต่าง ๆ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของสมาชิกของกลุ่มและเกษตรกร จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการผลิตอ้อยของประเทศ

บรรณานุกรม

กรมพัฒนาที่ดิน. 2553. **คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า เล่ม 2**. สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กรมวิชาการเกษตร. 2547. **เกษตรดีที่เหมาะสมสำหรับอ้อย.เอกสารวิชาการลำดับที่ 19**. กรมวิชาการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กองอุตสาหกรรมอ้อย น้ำตาลทราย และอุตสาหกรรมต่อเนื่อง. 2561. **รายงานประสิทธิภาพการผลิตน้ำตาลทราย ฤดูการผลิตปี 2560/2661.** กองอุตสาหกรรมอ้อย น้ำตาลทราย และอุตสาหกรรมต่อเนื่อง สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2541. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพ.

เฉลิมพล ไหลรุ่งเรือง. 2547. **ประวัติความสำคัญ เอกสารวิชาการอ้อย**. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ชุลีพร กุศลคุ้ม และกาญจนา เศรษฐนันท์. 2555. “การศึกษาต้นทุนและผลตอบแทนในการผลิตอ้อยเข้าสู่โรงงานของชาวไร่อ้อยรายย่อยในเขตพื้นที่ตำบลบัวขาว อำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดกาฬสินธุ์”. ใน **การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2555** 17-19 ตุลาคม 2555 ชะอำ เพชรบุรี.

ทักษิณา ศันสยะวิชัย กอบเกียรติ ไพศาลเจริญ และปรีชา กาเพ็ชร. 2548. “การตอบสนองต่อปุ๋ยของอ้อยพันธุ์ 94-2-200 อ้อยข้ามแล้ง ใน : การศึกษาลักษณะทางการเกษตรของโคลนอ้อยชุด 2537”. **รายงานผลงานวิจัยประจำปี 2551** ศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

นิชธิมา รุ่งปิ่น, สรพงษ์ ภวสุปรีย์, ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ และ ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ. 2553. “วิธีไฮโดรเทอร์มอลสำหรับการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากแหล่งธรรมชาติ.” หน้า 183-190. **ในการประชุมเชิงสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ.**

นิพนธ์ มาวัน และ วรรณวิภา แก้วประดิษฐ์. 2561. ระดับของปุ๋ยเคมีไนโตรเจนต่อผลผลิต ประสิทธิภาพการใช้ไนโตรเจน เอนไซม์ยูรีเอส และความอุดมสมบูรณ์ของดินหลังการเก็บเกี่ยวอ้อยในสภาพดินทราย. **วารสารเกษตรพระวรุณ** 15(1) : 74-84.

นุชนภา บุญมาก, อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ และบรรจง บุญชม. 2557. “การกำจัดเปลือกหอยแมลงภู่ โดยการผลิตโมโนแคลเซียมฟอสเฟตเพื่อใช้เป็นปุ๋ย”. **การประชุมวิชาการวิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13** ระหว่างวันที่ 26-28 มีนาคม 2557 ของสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

บริษัท ไทยรุ่งเรืองอุตสาหกรรม จำกัด และบริษัท ดี เค ที จำกัด. 2554. **รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ เรื่อง ผลของการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับสาร “กรีนเมท” ต่อการเจริญเติบโต และผลผลิตของอ้อยที่ปลูกในจังหวัดเพชรบูรณ์**. เข้าถึงได้ที่ : http://www.greencal.co.th/img/Final report_ไทยรุ่งเรือง_2554 อ้อยปลูก.pdf.

ปวัลญาพร ฟักทองหอม, อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ และ บรรจง บุญชม. 2557. “การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกหอยเชอรี่; ศัตรูพืชในนาข้าว”. **การประชุมวิชาการวิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13** ระหว่างวันที่ 26-28 มีนาคม 2557 ของสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.

ประสิทธิ์ ใจศิล. 2558. **เอกสารประกอบการฝึกอบรม โครงการจัดทำต้นทุนผลผลิตและถ่ายทอดความรู้เพื่อลดต้นทุนการผลิตอ้อยของเกษตรกรในปีเพาะปลูก 2557/58**. สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม.

ปรีชา กาเพ็ชร ชัยโรจน์ วงศ์วิวัฒน์ไชย ทักษิณา ศันสยะวิชัย กอบเกียรติ ไพศาลเจริญ และเจิม จาบประโคน. 2550. “การตอบสนองต่ออัตราปุ๋ยไนโตรเจนของอ้อยใน 2 ชุดดินจังหวัดขอนแก่น”. **รายงานผลงานวิจัยประจำปี 2559** ศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ยงยุทธ โอสถสภา อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และชวลิต ฮงประยูร. 2551. **ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วรุณทิพย์ ฉัตรจุฑามณี. 2560. “การสังเคราะห์โมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรตอย่างง่ายและรวดเร็วจากเปลือกหอยทราย”. **วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม** 13(2): 1-11.

วรางคณา อนุชิตโอฬาร. 2546. “**FT-IR Imaging**”. เข้าถึงได้ที่ : https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/212_67-70.pdf.

วีระพล พลภัคดี ทักษิณา ศันสยะวิชัย เพียงเพ็ญ ศรวัต เทวา เมาลานนท์ ปรีชา กาเพ็ชร และอุดม เลียบวัน. 2554. “ขอนแก่น 3 พันธุ์อ้อยสำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ”. **วารสารวิชาการเกษตร** 29 : 283-301.

ศศิพันธุ์ ณ สงขลา, อุษณีย์ ศันตติวงศ์ไชย, สุรพงษ์ พิมพ์จันทร์ และ ชาญชัย อัศววินิจกุลชัย. 2539. "**การวิเคราะห์ธาตุในเปลือกหอยโดยวิธีนิวเคลียร์**" เข้าถึงได้ที่ : https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/041/30041211.pdf.

สามารถ จับโจร อาวุธ คันศร และทองไมย์ เทพราม. 2561. "การออกแบบและสร้างสรรค์ประติมากรรมหินทรายจากเปลือกหอยของหอยเชอรี่เพื่อเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้แก่ชุมชนบ้านท่าหลวง อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา". **วารสารชุมชนวิจัย** 12(3) : 52-65.

สุดชล วุ้นประเสริฐ และ ธีรยุทธ เกิดไทย. 2558. **รายงานการวิจัย การจัดการดินและน้ำเพื่อเพิ่มผลผลิตอ้อยตอในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ** สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2562. **สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2561**. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. 2561. **ประกาศสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย เรื่อง การกำหนดราคาอ้อยขั้นสุดท้ายและผลตอบแทนการผลิตและจำหน่ายน้ำตาลขั้นสุดท้ายฤดูการผลิตปี 2559/2560**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้ที่ : www.ocsb.go.th/upload/cuntry/fileupload/420-3688.pdf.

สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. 2562. **รายชื่อโรงงานน้ำตาลฉบับภาษาไทย** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้ที่ : www.ocsb.go.th/upload/download/uploadfile/25-6750.pdf.

สำนักนโยบายอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย. 2560. **รายงานพื้นที่ปลูกอ้อยปีการผลิต 2559/60**. สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม.

สำนักนโยบายอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทราย. 2561. **รายงานพื้นที่ปลูกอ้อยปีการผลิต 2560/61**. สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม.

Anderson, F.A. and Brecevic, L. 1991. "Infrared spectra of amorphous and crystalline calcium carbonate." **Acta Chemical Scandinavica** 45 : 1018-1024.

Barton, C.J. 1948. "Photometric analysis of phosphate rock". **Analytical Chemistry** 20 : 1068-1073.

Boey, P.L., Maniam, G.P., Hamid, S.A. and Ali, D.M.H. 2011. "Utilization of waste cockle shell (*Anadara granosa*) in biodiesel production from palm olein: optimization using response surface methodology". **Fuel** 90(7) : 2353-2358.

Bolan, N., Syers, J. and Tillman, R. 1986. "Ionic strength effects on surface charge and adsorption of phosphate and sulphate by soils". **Journal of Soil Science** 37 : 379-388.

Boonchom, B. 2009. “Parallelogram-like microparticles of calcium dihydrogen phosphate monohydrate ($Ca(H_2PO_4)$ $2{\cdot}H_2O$) obtained by a rapid precipitation route in aqueous and acetone media”. **Journal of Alloys and Compounds** 482 (1–2): 199-202.

Boonchom, B. and Danvirutai, C. 2009. “The morphology and thermal behavior of calcium dihydrogen phosphate monohydrate ($Ca(H_2PO_4)_2.2H_2O$) obtained by a rapid precipitation route at ambient temperature in different media”. **Journal of Optoelectronic and Biomedical** 1: 115-123.

Bray, R.H., and Kurtz, L.T. 1945. “Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils”. **Soil Science** 59: 39-45.

Carlsson, N. O., Brönmark, C. and Hansson, L. A. 2004. “Invading herbivory: the golden apple snail alters ecosystem functioning in Asian wetlands”. **Ecology** 85 : 1575-1580.

Castillo, M.S. and Wright, A.L. 2008. “Soil phosphorus pools for Histosols under sugarcane and pasture in the Everglades, USA”. **Geoderma** 145(1-2) : 130-135.

Chen, Q., Zhang, X., Zhang, H., Christie, P., Li, X., Horlacher, D. and Liebig, H.P. 2004. “Evaluation of current fertilizer practice and soil fertility in vegetable production in the Beijing region”. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** 69(1) : 51-58.

Chien, S.H. 1993. “Solubility assessment for fertilizer containing phosphate rock”. **Fertilizer Research** 35 : 93-99.

Clough, G.H. 1994. “Potato tuber yield, mineral concentration, and quality after calcium fertilization”. **Journal of the American Society for Horticultural Science**. 119(2) : 175-179.

Coale, F.J., Sanchez, C.A., Izuno, F.T. and Bottcher, A.B. 1993. “Nutrient accumulation and removal by sugarcane grown on Everglades Histosols”. **Agronomy Journal** 85(2) : 310-315.

Cuneyt Tas A. 2016. “Transformation of Brushite ($CaHPO_4{\cdot}2H_2O$) to Whitlockite ($Ca_9Mg(HPO_4)(PO_4)_6$) or other CaPs in Physiologically Relevant Solutions”. **J. Am. Ceram. Soc**. 99(4) : 1200–1206.

Dahlan, K., Haryati, E., Togibasa, O. and Dahlan, K. 2019. “Characterization of calcium powders from Merauke mangrove crab shells”. **J. Phys.: Conf. Ser.** 1204: 012030. Doi:10.1088/1742-6596/1204/1/012030.

Daniel, T.C., Sharpley, A.N., Edwards, D.R., Wedepohl, R. and Lemunyon, J.L. 1994. "Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorous management". **JOURNAL OF SOIL AND WATER CONSERVATION-USA** 49 : 30-30.

Department of Agriculture. 2009. **The document of sugarcane cultivation** [online]. [Accessed December 15, 2015]. Available from: URL: http://www.doa.go.th/fcrc/nsn/filedownload/l90sugarcane.pdf.

DePaula, S.M., Huila, M.F.G., Araki, K. and Toma, H.E., 2010. "Confocal Raman and electronic microscopy studies on the topotactic conversion of calcium carbonate from *Pomacea lineate* shells into hydroxyapatite bioceramic materials in phosphate media". **Micron** 41(8): 983-989.

Dominy, C., Haynes, R. and Van Antwerpen, R. 2002. "Loss of soil organic matter and related soil properties under long-term sugarcane production on two contrasting soils". **Biology and Fertility of Soils** 36(5) : 350-356.

Dorozhkin, S. V. 2010. "Amorphous calcium (ortho)phosphates". **Acta Biomaterialia** 6(12): 4457-4475.

Dorozhkin, S.V. 2011. "Calcium orthophosphates Occurrence, properties, biomineralization, pathological calcification and biomimetic applications." **Biomatter** 1(2) : 121-164.

Dorozhkin, S.V. 2013. "A detailed history of calcium orthophosphates from 1770s till 1950". **Materials Science and Engineering: C** 33(6) : 3085-3110.

Dorozhkin, S.V. and Epple, M. 2002. "Biological and medical significance of calcium phosphates". **Angewandte Chemie International Edition** 41(17) : 3130-3146.

Dosen A., and F. Giese R. 2011. "Thermal decomposition of brushite, $CaHPO_4·2H_2O$ to monetite $CaHPO_4$ and the formation of an amorphous phase". **Amer. Miner** 96 : 368-373.

Duncan, J., MacDonald, J. F., Hanna, J. V., Shirosaki, Y., Hayakawa, S., Osaka, A., Skakle, J. M. S.and Gibson, I. R. 2014. "The role of the chemical composition of monetite on the synthesis and properties of α-tricalcium phosphate". **Materials Science and Engineering** 34: 123-129.

FAO. 2018. **The state of world fishieries and aquaculture**. Meeting the sustainable development goals. Rome Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Farrah, A.O., Roxas, N.J., Jean, D. and Co, K. 2017. “Golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) shell as a neutralizer of acidic soil”. [Accessed December 14, 2017]. Available from: URL: https://www.researchgate.net/publication/320585453.

Giovannini, C., Garcia-Mina, J., Ciavatta, C. and Marzadori, C. 2013. “Effect of organic-complexed superphosphates on microbial biomass and microbial activity of soil”. **Biology and Fertility of Soils** 49 : 395-401.

Goundar, M.S., Morrison, R.J. and Togamana, C. 2014. “Phosphorus requirements of some selected soil types in the Fiji sugarcane belt”. **The South Pacific Journal of Natural and Applied Sciences** 32 : 1-14.

Graham, M.H., Haynes, R.J. and Meyer, J.H. 2002. “Soil organic matter content and quality: effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa”. **Soil biology and biochemistry** 34(1) : 93-102.

Hamester, M.R.R., Balzer, P.S. and Becker, D. 2012. “Characterization of calcium carbonate obtained from oyster and mussel shells and incorporation in polypropylene”. **Materials Research** 15(2) : 204-208.

Hossner, L.R. and Doll, E.C., 1970. “Magnesium Fertilization of Potatoes as Related to Liming and Potassium”. **Soil Science Society of America Journal** 34(5) : 772-774.

Hsu, C.K. 2002. “A study on thermal behavior of uncalcined $Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$ and $CaCO_3$ mixtures.” **Thermochimica Acta** 392-393 : 157-161.

Hsu, C.K. 2003. “The preparation of biphasic porous calcium phosphate by the mixture of $Ca(H_2PO_4)\ 2H_2O$ and $CaCO_3$”. **Materials chemistry and physics** 80(2) : 409-420.

Hu, H. Q., He, J. Z., Li, X. Y. and Liu, F. 2001. “Effect of several organic acids on phosphate adsorption by variable charge soils of central China”. **Environment International** 26 : 353-358.

Hue, N. 1991. “Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies”. **Soil Science** 152 : 463-471.

Hunsigi, G. 1993. **Production of sugarcane: theory and practice**. Springle-Verla. Berlin, Germany.

Hussain, S., Anwar-ul-Haq, M., Hussain, S., Akram, Z., Afzal, M. and Shabbir, I. 2017. "Best suited timing schedule of inorganic NPK fertilizers and its effect on qualitative and quantitative attributes of spring sown sugarcane (*Saccharum officinarum* L.)". **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences** 16(1) : 66-71.

Hsu, C.K. 2002. "A study on thermal behavior of uncalcined $Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$ and $CaCO_3$ mixtures." **Thermochimica Acta**. 392-393 : 157-161.

In Amjad, Z. (ed.), **Calcium Phosphates in Biological and Industrial Systems**. Kluwer Academic Publishers.

Inman-Bamber, N. G., Jackson, P. A. and Hewitt, M. 2011. "Sucrose accumulation in sugarcane stalks does not limit photosynthesis and biomass production". **Crop and Pasture Science** 62 : 848-858.

Jinawath, S., Pongkao, D., Suchanek, W. and Yoshimura, M. 2001. "Hydrothermal synthesis of monetite and hydroxyapatite from monocalcium phosphate monohydrate". **International Journal of Inorganic Materials** 3(7): 997-1001.

Joshi, R. C. and Sebastian, L. S. 2006. **Global advances in ecology and management of golden apple snails**. Philippine Rice Research Institute (PhilRice).

Kang, K. R., Piao, Z. G., Kim, J. S., Cho, I. A., Yim, M. J., Kim, B. H., Oh, J. S., Son, J. S., Kim, C. S., Kim, D. K., Lee, S. Y. and Kim, S. G. 2017. "Synthesis and Characterization of β-Tricalcium Phosphate Derived from *Haliotis* sp. Shells". **Implant Dentistry** 26**:** 378-387.

Khonghintaisong, J., Songsri, P., Toomsan, B. and Jongrungklang, N. 2018. "Rooting and physiological trait responses to early drought stress of sugarcane cultivars". **Sugar Tech** 20(4) : 396-406.

Landin, M., Rowe, R.C. and York, P. 1994. "Structural changes during the dehydration of dicalcium phosphate dehydrate". **European journal of pharmaceutical sciences** 2(3) : 245-252.

Laranjeira, C.M. 2000. "Calcium phosphate biomaterials from marine algae hydrothermal synthesis and characterization." **Quimica Nova** 23(4) : 441-446.

Lee, C.H., Lee, D., Ali, M.A. and Kim, P.J. 2008. "Effects of oyster shell on soil chemical and biological properties and cabbage productivity as a liming materials". **Waste Management** 28 : 2702- 2708.

Leelatawonchai, P. and Laonapakul, T. 2014. "Preparation and characterization of calcium sources from golden apple snail shell for naturally based biomaterials". **Advanced Materials Research**. 931-932: 370-374.

Liang, L., Rulis, P. and Ching, W.Y. 2010. "Mechanical properties, electronic structure and bonding of α- and β-tricalcium phosphates with surface characterization." **Acta Biomaterialia** 6 : 3763-3771.

Lijun Wang and George H. Nancollas 2008. "Calcium Orthophosphates: Crystallization and Dissolution". **Chemical Reviews** 108(11): 4628-4669.

Lingle, S.E. and Wiegand, C.L. 1997. "Soil salinity and sugarcane juice quality". **Field crops research** 54(2-3) : 259-268.

Maas, E.V. and Hoffman, G.J. 1977. "Crop salt tolerance–current assessment". **Journal of the irrigation and drainage division** 103(2) : 115-134.

Macha I., Sevgi Ozyegin L., Chou J., Samur R., Oktar F., and Ben-Nissan B. 2013. "An Alternative Synthesis Method for Di Calcium Phosphate (Monetite) Powders from Mediterranean Mussel (*Mytilus galloprovincialis*) Shells". **J. Australian Ceram. Soc**. 49(2) : 122 – 128.

Mardamootoo T., Kwong, K. F. N. K. and Preez, C. C. Du. 2013. "Assessing environmental phosphorus status of soils in Mauritius following long-term phosphorus fertilization of sugarcane". **Agricultural Water Management** 117 : 26–32.

Meyer, J. 2011. **Sugarcane nutrition and fertilization**. Good management practices manual for the cane sugar industry. Eds. J. Meyer. The International Finance Corporation (IFC). Johannesburg. South Africa. pp.173-226.

Miki, T. and Kai, A. 1991. "Thermal annealing of radicals in aragonitic $CaCO_3$ and $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$". **Japanese journal of applied physics** 30(2R) : 404.

Minh, D. P., Tran, N. D., Nzihou, A. and Sharrock, P. 2014. "Calcium phosphate based materials starting from calcium carbonate and orthophosphoric acid for the removal of lead(II) from an aqueous solution". **Chemical Engineering Journal** 243:280-288.

Mirhadi, B., Mehdikhani, B. and Askari, N., 2011. "Synthesis of nano-sized β-tricalcium phosphate via wet precipitation". **Processing and Application of Ceramics** 5(4) : 193-198.

Montañez-Supelano, N.D., Sandoval-Amador, A., Estupiñan-Durán, H.A. and Peña-Ballesteros, D.Y. 2017. "A novel biphasic calcium phosphate derived from fish otoliths". In **Journal of Physics: Conference Series**, December 2017. (Vol. 935, No. 1, p. 012037). IOP Publishing.

Muchow, R.C., Robertson, M.J. and Wood, A.W. 1996. "Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. II. Sucrose accumulation and commercial yield". **Field Crops Research** 48(1) : 27-36.

Nasri, K., El Feki, H., Sharrock, P., Fiallo, M. and Nzihou, A. 2015. "Spray-dried monocalcium phosphate monohydrate for soluble phosphate fertilizer". **Industrial & Engineering Chemistry Research** 54 : 8043-8047.

Nishad, K.V., Sureshbabu, S., Komath, M. and Unnikrishnan, G. 2017. "Synthesis and characterization of low dimensional bioactive monetite by solvent exchange method". **Materials Letters** 209: 19-22.

Nunn, R.J. and Dee, T.P. 1954. "Superphosphate production: The influence of various factors on the speed of reaction and the composition of the product". **Journal of the Science of Food and Agriculture** 5(6) : 257-265.

Ok, Y.S., Lim, J.E. and Moon, D.H. 2011. "Stabilization of Pb and Cd contaminated soils and soil quality improvements using waste oyster shells". **Environmental Geochemistry and Health** 33(1) : 83-91.

Oladoja, N., Ololade, I., Adesina, A., Adelagun, R. and Sani, Y. 2013. "Appraisal of gastropod shell as calcium ion source for phosphate removal and recovery in calcium phosphate minerals crystallization procedure". **Chemical Engineering Research and Design** 91 **:** 810-818.

Omollo, J.O. and Abaya, G.O. 2001. "Effect of Phosphorus Sources and Rates on Sugarcane Yield and Quality in Kibos, Nyando Sugar Zone. Innovations as Key to the Green Revolution in Africa". **Springer Science** 2 : 935-945.

Onoda H. and Nakanishi, H. 2012. "Preparation of calcium phosphate with oyster shells". **Natural Resources** 3 : 71-74.

Onoda, H. and Yamazaki, S. 2016. "Homogenous hydrothermal synthesis of calcium phosphate with calcium carbonate and corbicula shells". **Journal of Asian Ceramic Societies**, 4**:** 403-406.

Rhodes, R., Miles, N. and Hughes J.C., 2018. "Interactions between potassium, calcium and magnesium in sugarcane grown on two contrasting soils in South Africa". **Field Crops Research** 223 : 1-11.

Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. and Fucic, A. eds. 2012. **Toxicity of building materials**. Elsevier.

Pal, A., Nasker, P., Paul, S., Roy Chowdhury, A., Sinha, A. and Das, M. 2019. "Strontium doped hydroxyapatite from Mercenaria clam shells: Synthesis, mechanical and bioactivity study". **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials***,* 90**:** 328-336.

Pawar, M.W., Joshi, S.S. and Amodkar, V.T. 2003. "Effect of Foliar Application of Phosphorus and Micronutrients on Enzyme Activities and Juice Quality in Sugar Cane". **Sugar Tech** 5 (3) : 161 – 165.

Paz, C.G., Rodríguez, T.T., Behan-Pelletier, V.M., Hill, S.B., Vidal-Torrado, P., Cooper, M. and van Straaten, P. 2008. "**Fertilizer raw materials**". Encyclopedia of Soil Science**,** pp.241-247.

Putro, J.N., Handoyo, N., Kristiani, V., Soenjaya, S.A., Ki, O.L., Soetaredjo, F.E., Ju, Y.H. and Ismadji, S., 2014. *"Pomacea* sp. shell to hydroxyapatite using the ultrasound–microwave method (U–M)". **Ceramics International** 40(7): 11453-11456.

Sánchez-Enríquez, J. and Reyes-Gasga, J. 2013. "Obtaining $Ca(H_2PO_4)2{\cdot}H_2O$, monocalcium phosphate monohydrate, via monetite from brushite by using sonication". **Ultrasonics Sonochemistry** 20 (3): 948-954.

Shukla, S.K., Yadav, R.L., Singh, P.N. and Singh, I. 2009. "Potassium nutrition for improving stubble bud sprouting, dry matter partitioning, nutrient uptake and winter initiated sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid complex) ratoon yield". **European Journal of Agronomy** 30(1) : 27-33.

Singh, K.P., Suman, A., Singh, P.N. and Lal, M. 2007. "Yield and soil nutrient balance of a sugarcane plant–ratoon system with conventional and organic nutrient management in sub-tropical India". **Nutrient Cycling in Agroecosystems** 79(3) : 209-219.

Smith D.M., Inman-Bamber, N.G. and Thorburn, P.J. 2005. "Growth and function of the sugarcane root system". **Field Crops Research** 92(2-3) : 169-183.

Stevenson, F. J. and Cole, M. A. 1999. **Cycles of soils: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**, John Wiley & Sons. New York, USA. 429 p.

Sugar Research Australia. 2013. **Leaf sampling a key to improved nutrient management** (online). [Accessed December, 15 2015]. Available from: URL: https://sugarresearch.com.au/wp-content/uploads/2017/02/IS13014-Leaf-Sampling.pdf.

Sumner, M.E. and Miller, W.P. 1996. **Cation exchange capacity and exchange coefficients**. Methods of soil analysis, Part 3 Chemical methods (second edition). (Ed. D.L. Sparks) ASA and SSSA, Madison, Wisconsin. pp. 1201-1229.

Sunda, B., Natarajan, V. and Hari, K. 2002. "Influence of phosphorus solubilizing bacteria on the changes in soil available phosphorus and sugarcane and sugar yields". **Field Crops Research** 77 **:** 43-49.

Tămăşan, M., Ozyegin, L. S., Oktar, F. N. and Simon, V. 2013. "Characterization of calcium phosphate powders originating from *Phyllacanthus imperialis* and Trochidae *Infundibulum concavus* marine shells". **Materials Science and Engineering** 33 : 2569-2577.

Tas, A. C. 2009. "Monetite ($CaHPO_4$) Synthesis in Ethanol at Room Temperature". **Journal of the American Ceramic Society** 92(12) : 2907-2912.

Teo, S.S. 2004. "Biology of the golden apple snail, Pomacea canaliculata (Lamarck, 1822), with emphasis on responses to certain environmental conditions in Sabah, Malaysia". **Molluscan Research** 24(3) : 139-148.

Twarakavi, N.K., Šimůnek, J. and Schaap, M.G. 2010. "Can texture-based classification optimally classify soils with respect to soil hydraulics?". **Water Resources Research** 46(1).

Tynsuaadu, K. 1990. "Influence of silicic acid and glauconite on thermal dehydration of Ca (H_2PO_4) $2H_2O$". **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry** 36(5) : 1785-1793.

Wang, L., Fan, H., Zhang, Z.Y., Lou, A.J., Pei, G.X., Jiang, S., Mu, T.W., Qin, J.J., Chen, S.Y. and Jin, D. 2010. "Osteogenesis and angiogenesis of tissue-engineered bone constructed by prevascularized β-tricalcium phosphate scaffold and mesenchymal stem cells". **Biomaterials** 31(36) : 9452-9461.

Wang Y., Gao J., Hu J., and Zhang Y. 2009. "Solid reaction mechanism of $CaHPO_4{\cdot}2H_2O + CaCO_3$ with and without yttria". **Rare Met**. 28(1) : 77-81.

Wood, R.A. and Meyer, J.H. 1986. "Factors affecting potassium nutrition of sugarcane in South Africa". **Proceedings of the South African Sugar Technologist Association** 60 : 198-204.

Xu, J., Butler, I.S. and Gilson, D.F., 1999. "FT-Raman and high-pressure infrared spectroscopic studies of dicalcium phosphate dihydrate ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$) and anhydrous dicalcium phosphate ($CaHPO_4$)". **Spectrochimica Acta** Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 55(14) : 2801-2809.

Xu, J., Gilson, D.F. and Butler, I.S., 1998. "FT-Raman and high-pressure FT-infrared spectroscopic investigation of monocalcium phosphate monohydrate, Ca (H_2PO_4) 2· H_2O". **Spectrochimica Acta** Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 54(12) : 1869-1878.

Yashima, M., Sakai, A., Kamiyama, T. and Hoshikawa, A. 2003. "Crystal structure analysis of β-tricalcium phosphate $Ca_3(PO_4)_2$ by neutron powder diffraction." **J Solid State Chemical** 175 : 272-277.

Yin, X. and Stott, M.J. 2003. "α- and β-tricalcium phosphate: A density functional study**" Physical review B** 68 : 205205-1 – 205205-8.

Zavgorodniy, A.V., Borrero-López, O., Hoffman, M., LeGeros, R.Z. and Rohanizadeh, R. 2011. "Characterization of the chemically deposited hydroxyapatite coating on a titanium substrate". **Journal of Materials Science: Materials in Medicine** 22(1) : 1-9.

Zou, C., Cheng, K., Weng, W., Song, C., Du, P., Shen, G. and Han, G., 2011. "Characterization and dissolution–reprecipitation behavior of biphasic tricalcium phosphate powders". **Journal of Alloys and Compounds** 509(24) : 6852-6858.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายสมเกียรติ สีสนอง
วัน เดือน ปีเกิด	7 กันยายน 2514
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2538 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเกษตรศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
	พ.ศ. 2542 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
	สาขาวิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์