รายงาน

ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ด้วยไบโอชาร์ ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตพืช

Study of increasing the efficiency of biofertilizer LDD 12 by using biochar for to improvement of soil fertility and plant yield

โดย

นางจันจิรา แสงสีเหลือง
กองเทคโนโลยีชีวภาพทางดิน
กรมพัฒนาที่ดิน
ตุลาคม 2560

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง (ถ้ามี)	(2)
สารบัญภาพ (ถ้ามี)	(4)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ระยะเวลาและสถานที่ดำเนินงาน	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 อุปกรณ์และวิธีการ	2
บทที่ 2 ข้อมูลทั่วไป	16
2.1คะน้า	16
2.2 สมบัติดินในพื้นที่ศึกษา	17
บทที่ 3 ตรวจเอกสาร	18
3.1 ไบโอชาร์ (biochar	18
3.2 ปุ๋ยชีวภาพและการใช้ประโยชน์ทางการเกษตร	25
3.3 การประยุกต์ใช้วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเกษตรเป็นแหล่งอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์	28
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิจารณ์	32
4.1 การศึกษาการผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว	32
4.2 การศึกษาอัตราส่วนของไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว	39
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพของไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลวต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเจริญเติบโต และผลผลิตของคะน้าในแปลง	43
4.4 ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้า	67
บทที่ 5 สรุป	69
5.1 สรุปผลการศึกษา	69
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ	70
5.3 ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารอ้างอิง	71

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1	สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว	3
ตารางที่ 2	องค์ประกอบทางเคมีของอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวแต่ละสูตร	5
ตารางที่ 3	ปริมาณแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 และอาหารเลี้ยงเชื้อเริ่มต้น 0 ชั่วโมง	6
ตารางที่ 4	สมบัติทางเคมีของไบโอชาร์แกลบ	7
ตารางที่ 5	ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ	33
ตารางที่ 6	ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัสตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ	34
ตารางที่ 7	ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ	35
ตารางที่ 8	ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืชตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ	36
ตารางที่ 9	ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ	37
ตารางที่ 10	ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระและปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืชในไบโอชาร์แกลบ	41
ตารางที่ 11	ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัสและปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมในไบโอชาร์แกลบ	42
ตารางที่ 12	สมบัติทางเคมีของดินก่อนและหลังการทดลองของค่าการนำไฟฟ้าและความเป็นกรดเป็นด่างของดินจากการปลูกครั้งที่ 1	46
ตารางที่ 13	สมบัติทางเคมีของดินก่อนและหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1	47
ตารางที่ 14	สมบัติทางเคมีของดินหลังการทดลองของค่าการนำไฟฟ้าและความเป็นกรดเป็นด่างของดินจากการปลูกครั้งที่ 2	52
ตารางที่ 15	สมบัติทางเคมีของดินหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 2	53
ตารางที่ 16	สมบัติทางกายภาพของดินก่อนและหลังการทดลองในสภาพแปลง	55
ตารางที่ 17	ปริมาณแบคทีเรียในดินก่อนและหลังการทดลองสิ้นสุดจากการปลูกครั้งที่ 2	58
ตารางที่ 18	ความสูงของต้นคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวในการปลูกครั้งที่ 1 และการปลูกครั้งที่ 2	60

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ 19	ค่าความเขียวของใบคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกครั้งที่ 1 และการปลูกครั้งที่ 2	62
ตารางที่ 20	ขนาดพื้นที่ใบคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกครั้งที่ 1 และการปลูกครั้งที่ 2	64
ตารางที่ 21	น้ำหนักแห้งต่อต้นคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกครั้งที่ 1 และการปลูกครั้งที่ 2	65
ตารางที่ 22	น้ำหนักต้นคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกครั้งที่ 1 และการปลูกครั้งที่ 2	67
ตารางที่ 23	ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจในจากการปลูกครั้งที่ 1 และการปลูกครั้งที่ 2	68

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 1	แผนผังแปลงทดลองภาคสนาม	10
ภาพที่ 2	แสดงระยะปลูก พื้นที่เก็บข้อมูล และพื้นที่เก็บเกี่ยวคะน้าในแปลงย่อย	10
ภาพที่ 3	กระบวนการตรึงเซลล์จุลินทรีย์ด้วยไบโอชาร์	23
ภาพที่ 4	ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของไบโอชาร์แกลบ	23
ภาพที่ 5	ลักษณะของเซลล์แบคทีเรียในรูพรุนไบโอชาร์แกลบ (A) ขยาย 4,000 เท่า (B) ขยาย 8,000 เท่า	43
ภาพที่ 6	ลักษณะเซลล์แบคทีเรียบนพื้นผิวและช่องว่างรูพรุนของไบโอชาร์แกลบภายหลังการทดลอง (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า (B) และ (C) กำลังขยาย 4,000 เท่า	57

บทที่ 1
บทนำ

1.1 หลักการเหตุผล

ประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนและมรสุม ซึ่งเป็นสภาพที่เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์ในดิน ส่งเสริมให้อัตราการย่อยสลายอินทรียวัตถุในดินเกิดอย่างรวดเร็ว ทำให้พื้นที่เกษตรกรรมส่วนใหญ่มีปริมาณอินทรียวัตถุค่อนข้างต่ำ อีกทั้งผลผลิตเฉลี่ยต่อหน่วยพื้นที่ของการเพาะปลูกพืชชนิดต่าง ๆ ยังอยู่ระดับต่ำ เนื่องมาจากพื้นที่เกษตรกรรมมีความเสื่อมโทรม สาเหตุมาจากการใช้ประโยชน์ทรัพยากรที่ดินอย่างต่อเนื่อง ขาดการปรับปรุงบำรุงดินที่ถูกต้อง การใช้สารเคมี และการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรภายหลังการเก็บเกี่ยวด้วยการเผาในที่โล่งแจ้ง อีกทั้งสภาพการเปลี่ยนแปลงทางภูมิอากาศโลกมีผลกระทบโดยตรงต่อการเพาะปลูกและผลผลิตพืช ก่อให้เกิดปัญหาการชะล้างพังทลายของดิน ดินเสื่อมความอุดมสมบูรณ์ และสภาพแวดล้อมระบบนิเวศดินขาดสมดุล ดังนั้นการพัฒนางานด้านการบำรุงดินจากการใช้ประโยชน์ของถ่านไบโอชาร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากมวลชีวภาพของวัสดุเหลือทางการเกษตรที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนโดยไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้วัสดุมีรูพรุนและคาร์บอนคงตัวสูง สามารถเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน มีบทบาทต่อกระบวนการทางชีวเคมีในดิน การหมุนเวียนธาตุอาหาร การแลกเปลี่ยนประจุบวก และการดูดซับประจุของธาตุอาหารพืชในดิน และคุณสมบัติเด่นเป็นคาร์บอนที่มีความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดิน ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน ลดความหนาแน่นรวมของดิน ช่วยอุ้มน้ำรักษาความชื้นได้ดี รวมทั้งมีปริมาณธาตุอาหาร เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ในดิน ช่วยป้องกันจุลินทรีย์ในดินจากผู้ล่า และความแห้งแล้งจากการระเหยของน้ำ อีกทั้งยังเป็นแหล่งคาร์บอน พลังงาน และแร่ธาตุต่าง ๆ ให้กับจุลินทรีย์ดิน ส่งผลต่อประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในดิน และการหมุนเวียนธาตุอาหารพืช การนำมาใช้ประโยชน์เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถสร้างธาตุอาหาร หรือช่วยให้ธาตุอาหารเป็นประโยชน์กับพืช เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน ได้แก่ แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ สามารถตรึงก๊าซไนโตรเจนในอากาศ และเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแอมโมเนียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัสเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน แบคทีเรียละลายโพแทสเซียมมีกลไกการละลายโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปแร่ธรรมชาติ และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช ได้แก่ ออกซิน จิบเบอเรลลิน และไซโตไคนิน ช่วยกระตุ้นการเจริญของรากขนอ่อน และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวรากพืช ทำให้ความสามารถในการดูดน้ำและธาตุอาหารเพิ่มมากขึ้น ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตและเพิ่มผลผลิตพืช อีกทั้งส่งเสริมระบบนิเวศดินสร้างสมดุลของกลุ่มจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ทางการเกษตร

ดังนั้นการศึกษาพัฒนาการบำรุงดินด้วยไบโอชาร์ร่วมกับเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารให้กับพืชด้วยแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ ละลายฟอสฟอรัส ละลายโพแทสเซียม และสร้างฮอร์โมนพืช จะเป็นการส่งเสริมการเพิ่มประสิทธิภาพด้านบำรุงดินด้วยอินทรียวัตถุรูปเสถียรทนต่อการย่อยสลาย และเพิ่มธาตุอาหารพืชจากธรรมชาติ มีความสำคัญอย่างยิ่งเป็นประโยชน์ทางการเกษตรในการบำรุงดิน และเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรอย่างยั่งยืนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการและอัตราการใช้ที่เหมาะสมของไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับเซลล์จุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเจริญเติบโต และผลผลิตของคะน้าในแปลงทดลอง

1.3 ระยะเวลาการดำเนินการ ตุลาคม พ.ศ. 2558 - กันยายน พ.ศ. 2559

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษา 3 การทดลอง ดังนี้ การทดลองที่ 1 การศึกษาอัตราส่วนผสมของน้ำกากส่าต่อกากน้ำตาลที่เหมาะสม สำหรับเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อในการผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในห้องปฏิบัติการ การทดลองที่ 2 การศึกษาวิธีการผลิตไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 โดยมีการศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยที่ 1 คือ อัตราส่วนของไบโอชาร์แกลบต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จำนวน 3 อัตราส่วน ได้แก่ 1 : 2 1 : 3 และ 1 : 4 และปัจจัยที่ 2 คือ ระยะเวลาการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ช่วงเวลา 3 ช่วง ได้แก่ 1 3 และ 6 ชั่วโมง และการทดลองที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพของไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเจริญเติบโต และผลผลิตของคะน้าในแปลงทดลอง และผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้า 2 รอบ เพื่อเป็นต้นแบบเทคโนโลยีด้านการบำรุงดินด้วยอินทรียวัตถุที่เสถียรสูงจากไบโอชาร์ และการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้อุตสาหกรรมเกษตร ได้แก่ น้ำกากส่า และกากน้ำตาล สำหรับเป็นแหล่งอาหารเลี้ยงเชื้อต้นทุนต่ำในการผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว เพื่อใช้ประโยชน์ทางการเกษตรด้านการบำรุงดินและเพิ่มธาตุอาหารพืช

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ

1.5.1 อุปกรณ์

1) อุปกรณ์เครื่องแก้ว เครื่องมือในการแยกเชื้อ และนับเชื้อจุลินทรีย์

2) อุปกรณ์ภาคสนาม ได้แก่ อุปกรณ์เก็บดิน และอุปกรณ์เก็บพืช

3) เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ได้แก่

3.1) เครื่อง autoclave

3.2) เครื่อง centrifuge

3.3) เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (spectrophotometer)

3.4) เครื่อง chlorophyll meter (Minolta Co., Ltd., JAPAN: SPAD-502 model)

3.5) เครื่องวัดพื้นที่ใบ (CID Bio-Science, CI203)

3.6) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope)

4) สารเคมีสำหรับอาหารเลี้ยงเชื้อ ได้แก่

4.1) สูตรอาหาร N - free Burk agar medium

4.2) สูตรอาหาร Pikovskaya’s agar medium

4.3) สูตรอาหาร Sucrose minimal salts agar medium

4.4) สูตรอาหาร Glucose peptone agar

5) ไบโอชาร์แกลบ

6) ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน

7) น้ำกากส่า

8) กากน้ำตาล

9) ปุ๋ยเคมี ได้แก่ สูตร 46 - 0 - 0 สูตร 18 - 46 - 0 และสูตร 0 - 0 - 60

10) เมล็ดพันธุ์คะน้ายอด

1.5.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

1) การทดลองที่ 1 การศึกษาอัตราส่วนผสมของน้ำกากส่าต่อกากน้ำตาลที่เหมาะสม สำหรับเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อในการผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ในห้องปฏิบัติการในห้องปฏิบัติการ

1.1) วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ประกอบด้วย 8 สูตร จำนวน 3 ซ้ำ ดังนี้

สูตร 1 = น้ำกากส่า 5 %
สูตร 2 = กากน้ำตาล 5 %
สูตร 3 = น้ำกากส่า 10 % + กากน้ำตาล 5 %
สูตร 4 = น้ำกากส่า 20 % + กากน้ำตาล 5 %
สูตร 5 = น้ำกากส่า 30 % + กากน้ำตาล 5 %
สูตร 6 = น้ำกากส่า 40 % + กากน้ำตาล 5 %
สูตร 7 = น้ำกากส่า 50 % + กากน้ำตาล 5 %
สูตร 8 = น้ำกากส่า 100% + กากน้ำตาล 5 %

1.2) ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.2.1) นำวัสดุที่ใช้ในการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ได้แก่ น้ำกากส่าและกากน้ำตาลไปทำการทดสอบวิเคราะห์ธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ธาตุอาหารรอง ได้แก่ แคลเซียม และแมกนีเซียม และค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และค่าการนำไฟฟ้า รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 แบบเหลว

ชนิด	องค์ประกอบทางเคมี						
	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)	CaO (%)	MgO (%)	pH	EC (dS/m)
น้ำกากส่า	0.080	0.01	0.300	0.11	0.05	4.85	8.48
กากน้ำตาล	0.725	0.070	0.620	-	-	4.87	20.81

1.2.2) การเตรียมการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ตามแต่ละสูตร ดังนี้

สูตร 1 ใส่น้ำ 190 มิลลิลิตร และน้ำกากส่า 10 มิลลิลิตร (5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร นำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 (ผลิตภัณฑ์ของกรมพัฒนาที่ดิน) 0.20 กรัม (0.1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) แล้วนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง

สูตร 2 ใส่น้ำ 190 มิลลิลิตร และกากน้ำตาล 10 มิลลิลิตร (5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร นำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 0.20 กรัม แล้วนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง

สูตร 3 ใส่น้ำ 170 มิลลิลิตร น้ำกากส่า 20 มิลลิลิตร (10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) และกากน้ำตาล 10 มิลลิลิตร (5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร นำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 0.20 กรัม แล้วนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง

สูตร 4 ใส่น้ำ 150 มิลลิลิตร น้ำกากส่า 40 มิลลิลิตร (20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) และกากน้ำตาล 10 มิลลิลิตร (5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร นำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 0.20 กรัม แล้วนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง

สูตร 5 ใส่น้ำ 130 มิลลิลิตร น้ำกากส่า 60 มิลลิลิตร (30 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) และกากน้ำตาล 10 มิลลิลิตร (5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร นำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 0.20 กรัม แล้วนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง

สูตร 6 ใส่น้ำ 110 มิลลิลิตร น้ำกากส่า 80 มิลลิลิตร (40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) และกากน้ำตาล 10 มิลลิลิตร (5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร นำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 0.20 กรัม แล้วนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง

สูตร 7 ใส่น้ำ 90 มิลลิลิตร น้ำกากส่า 100 มิลลิลิตร (50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) และกากน้ำตาล 10 มิลลิลิตร (5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร นำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 0.20 กรัม แล้วนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง

สูตร 8 ใส่น้ำกากส่า 190 มิลลิลิตร (100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) และกากน้ำตาล 10 มิลลิลิตร (5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร นำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 0.20 กรัม แล้วนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง

1.2.3) ปริมาณธาตุอาหารที่ใช้ในการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว เมื่อประเมินปริมาณธาตุอาหารในแต่ละสูตร รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2 ดังนี้

1.2.4) ปริมาณแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน ประกอบด้วยแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ 7.792 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส

8.982 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม 8.897 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช 7.944 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร แสดงในตารางที่ 3

1.2.5) ปริมาณแบคทีเรียในอาหารเลี้ยงเชื้อที่เวลาเริ่มต้น 0 ชั่วโมง ประกอบด้วยแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ 4.922 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส 6.541 log no. ต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม 6.639 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช 4.864 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวแต่ละสูตร

สูตรอาหารเหลว	องค์ประกอบทางเคมี					
	N (%)	P_2O_5 (%)	K_2O (%)	CaO (%)	MgO (%)	pH
สูตร 1 = น้ำกากส่า 5 %	0.004	0.0005	0.015	0.0055	0.0025	6.17
สูตร 2 = กากน้ำตาล 5 %	0.036	0.004	0.031	-	-	6.16
สูตร 3 = น้ำกากส่า 10 %	0.008	0.001	0.030	0.011	0.005	
กากน้ำตาล 5 %	0.036	0.004	0.031	-	-	
รวม	0.044	0.005	0.061	0.011	0.005	5.84
สูตร 4 = น้ำกากส่า 20 %	0.016	0.002	0.060	0.022	0.010	
กากน้ำตาล 5 %	0.036	0.004	0.031	-	-	
รวม	0.052	0.006	0.091	0.022	0.010	5.80
สูตร 5 = น้ำกากส่า 30 %	0.024	0.003	0.090	0.033	0.015	
กากน้ำตาล 5 %	0.036	0.004	0.031	-	-	
รวม	0.060	0.007	0.121	0.033	0.015	5.50
สูตร 6 = น้ำกากส่า 40 %	0.032	0.004	0.120	0.044	0.020	
กากน้ำตาล 5 %	0.036	0.004	0.031	-	-	
รวม	0.068	0.008	0.151	0.044	0.020	5.21
สูตร 7 = น้ำกากส่า 50 %	0.040	0.005	0.150	0.055	0.025	
กากน้ำตาล 5 %	0.036	0.004	0.031	-	-	
รวม	0.076	0.009	0.181	0.055	0.025	5.17
สูตร 8 = น้ำกากส่า 100%	0.080	0.010	0.300	0.110	0.050	
กากน้ำตาล 5 %	0.036	0.004	0.031	-	-	
รวม	0.116	0.014	0.331	0.110	0.050	4.95

ตารางที่ 3 ปริมาณแบคทีเรียในผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 และอาหารเลี้ยงเชื้อเริ่มต้น 0 ชั่วโมง

ชนิด	ปริมาณแบคทีเรีย (log เซลล์ต่อมิลลิลิตร)	
	ผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12	อาหารเลี้ยงเชื้อเริ่มต้น 0 ชั่วโมง
แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ	7.792	4.922
แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส	8.982	6.541
แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม	8.897	6.639
แบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช	7.944	4.864

1.3) การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ตัวอย่าง

ทำการเก็บตัวอย่างภายหลังการหมักขยายเชื้อที่เวลา 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

1.3.1) ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ทั้ง 4 ชนิด ดังนี้

(1) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ (nitrogen fixing bacteria, NFB) ทำการแยกเชื้อโดยวิธีการ spread plate บนอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่มีแหล่งไนโตรเจนในสูตรอาหาร N - free Burk agar medium โดยวิธี soil dilution plating method selective media

(2) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส (phosphate solubilizing bacteria, PSB) ทำการแยกเชื้อจุลินทรีย์โดยวิธีการ spread plate ในอาหาร Pikovskaya’s agar medium บ่มเป็นเวลา 2 - 3 วัน สังเกตวงใสรอบโคโลนี

(3) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม (potassium solubilizing bacteria, KSB) ทำการแยกเชื้อจุลินทรีย์บนอาหาร สูตรอาหาร Sucrose minimal salts agar medium ที่มี dihydrogen potassium phosphate เป็นส่วนประกอบและมี bromthymol blue ผสมอยู่เพื่อเป็นดัชนีบ่งชี้การผลิตกรดอินทรีย์ของจุลินทรีย์ สังเกตการเปลี่ยนสีของอาหารจากสีเขียวเป็นสีเหลือง

(4) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนให้พืช (plant growth promoting rhizobacteria, PGPR) โดยใช้วิธี spread plate บนอาหาร glucose peptone agar บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน

1.3.2) ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อ

2) การทดลองที่ 2 การศึกษาวิธีการและอัตราส่วนของไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับเซลล์แบคทีเรียของปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว เพื่อผลิตเป็นไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12

2.1) วางแผนการทดลองแบบ 3 x 3 factorial in completely randomized design มีจำนวน 3 ซ้ำ ปัจจัยศึกษา 2 ปัจจัย ดังนี้

ปัจจัยที่ 1 อัตราส่วนระหว่างไบโอชาร์แกลบต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จำนวน 3 อัตราส่วน ดังนี้

อัตราส่วนที่ 1 ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 2

อัตราส่วนที่ 2 ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 3

อัตราส่วนที่ 3 ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 4

ปัจจัยที่ 2 ระยะเวลาไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับเซลล์จุลินทรีย์ จำนวน 3 ช่วงเวลา ดังนี้

ช่วงที่ 1 ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

ช่วงที่ 2 ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

ช่วงที่ 3 ระยะเวลา 6 ชั่วโมง

2.2) ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

2.2.1) นำวัสดุไบโอชาร์แกลบที่ผลิตเพื่อใช้ทดสอบไปวิเคราะห์ธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ธาตุอาหารรอง ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และค่าการนำไฟฟ้า รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติทางเคมีของไบโอชาร์แกลบ

ชนิด	Total (%)							
	N	P	K	Ca	Mg	S	pH	EC (dS/m)
ไบโอชาร์แกลบ	0.7	0.2	1.0	0.01	0.10	0.10	9.6	0.50

2.2.2) การเตรียมปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ดังนี้

(1) ส่วนผสมสำหรับการผลิตปริมาตร 100 ลิตร ประกอบด้วยน้ำกากส่า 10 ลิตร (10 เปอร์เซ็นต์) กากน้ำตาล 5 ลิตร (5 เปอร์เซ็นต์) น้ำ 85 ลิตร และหัวเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 จำนวน 1 ซอง (100 กรัม)

(2) วิธีการผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด.12 แบบเหลว นำน้ำกากส่าผสมกับกากน้ำตาลในถังพลาสติกขนาด 120 ลิตร คนให้เข้ากันแล้วเติมน้ำ หลังจากนั้นใส่หัวเชื้อจุลินทรีย์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 จำนวน 1 ซอง คนให้เข้ากันนาน 5 นาที และให้ออกซิเจนจากเครื่องปั๊มออกซิเจนปลาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำไปใช้ทดลองต่อไป

2.2.3) การเตรียมไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ตามวิธีการการทดลอง ดังนี้

(1) อัตราส่วนที่ 1 คือ ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 2 บรรจุไบโอชาร์แกลบจำนวน 100 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเทปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จำนวน 200 มิลลิลิตร ดำเนินการจำนวน 3 ชุดการทดลอง โดยกำหนดระยะเวลาแช่ไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ดังนี้ ชุดการทดลองที่ 1 ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 2 ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และชุดการทดลองที่ 3 ระยะเวลา 6 ชั่วโมง

(2) อัตราส่วนที่ 2 คือ ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 3 บรรจุไบโอชาร์แกลบจำนวน 100 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเทปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จำนวน 300 มิลลิลิตร ดำเนินการจำนวน 3 ชุดการทดลอง โดยกำหนดระยะเวลาแช่ไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับ

ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ดังนี้ ชุดการทดลองที่ 1 ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 2 ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และชุดการทดลองที่ 3 ระยะเวลา 6 ชั่วโมง

(3) อัตราส่วนที่ 3 คือ ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 4 บรรจุไบโอชาร์แกลบจำนวน 100 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเทปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จำนวน 400 มิลลิลิตร ดำเนินการจำนวน 3 ชุดการทดลอง โดยกำหนดระยะเวลาแช่ไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ดังนี้ ชุดการทดลองที่ 1 ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 2 ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และชุดการทดลองที่ 3 ระยะเวลา 6 ชั่วโมง

2.3) การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ตัวอย่าง

2.3.1) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียทั้ง 4 ชนิด ดังนี้

(1) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ ทำการแยกเชื้อโดยวิธีการ spread plate บนอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่มีแหล่งไนโตรเจน สูตรอาหาร N - free Burk agar medium โดยวิธี soil dilution plating method selective media

(2) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส ทำการแยกเชื้อจุลินทรีย์โดยวิธีการ spread plate ในอาหาร Pikovskaya’s agar medium บ่มเป็นเวลา 2 - 3 วัน สังเกตวงใสรอบโคโลนี

(3) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม ทำการแยกเชื้อจุลินทรีย์บนอาหารสูตรอาหาร Sucrose minimal salts agar medium ที่มี dihydrogen potassium phosphate เป็นส่วนประกอบและมี bromthymol blue ผสมอยู่เพื่อเป็นดัชนีบ่งชี้การผลิตกรดอินทรีย์ของจุลินทรีย์สังเกตการเปลี่ยนสีของอาหารจากสีเขียวเป็นสีเหลือง

(4) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนให้พืช โดยใช้วิธี spread plate บนอาหาร Glucose peptone agar บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน

2.3.2) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลโดยใช้วิธี Duncan’s New Multiple Range Test

2.3.3) การตรวจสอบการเข้าอาศัยของเซลล์จุลินทรีย์ภายในรูพรุนของไบโอชาร์แกลบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ดังนี้

(1) ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

(1.1) การเตรียมไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับเซลล์แบคทีเรียปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว นำตัวอย่างไบโอชาร์ใส่ซองพลาสติกทึบแสง และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

(1.2) นำตัวอย่างไบโอชาร์แกลบที่ตรึงเซลล์จุลินทรีย์ของแต่ละตำรับการทดลอง มาอบไล่ความชื้นในตัวอย่างให้มีความชื้นน้อยกว่า 6 เปอร์เซ็นต์ และนำตัวอย่างใส่โถแก้วดูดความชื้น (Desiccator) เพื่อดูดความชื้น และนำตัวอย่างมาติดบนแท่นติดตัวอย่าง นำมาส่องกล้องเพื่อตรวจสอบการเข้าอาศัยภายในรูพรุนไบโอชาร์ของเซลล์แบคทีเรีย ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้ศึกษาพื้นผิวของตัวอย่าง โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุทำให้ได้ภาพ

(2) การเก็บข้อมูลภาพถ่าย

ดำเนินการบันทึกลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า และ 8,000 เท่า บันทึกภาพการเข้าอาศัยภายในช่องว่างรูพรุนของถ่านไบโอชาร์แกลบ

3) การทดลองที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพของไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเจริญเติบโต และผลผลิตคะน้าในแปลง

3.1) วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อคสมบูรณ์ (randomized complete block design, RCBD) ประกอบด้วย 7 ตำรับทดลอง จำนวน 3 ซ้ำ ดังนี้

ตำรับการทดลองที่ 1 ไม่ใส่ปุ๋ย (control)
ตำรับการทดลองที่ 2 ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน
ตำรับการทดลองที่ 3 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน + ปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่
ตำรับการทดลองที่ 4 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน + ปุ๋ยชีวภาพ พด.12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่
ตำรับการทดลองที่ 5 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่
ตำรับการทดลองที่ 6 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่
ตำรับการทดลองที่ 7 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่

หมายเหตุ : งานวิจัยนี้ ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 หมายถึง ไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

3.2) ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2.1) การเตรียมปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก ตามคำแนะนำของกรมพัฒนาที่ดิน ส่วนผสมประกอบด้วยปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัม รำละเอียด 3 กิโลกรัม และหัวเชื้อจุลินทรีย์ 100 กรัม คลุกเคล้าให้เข้ากัน ปรับความชื้นให้ได้ 70 เปอร์เซ็นต์ บ่มไว้เป็นเวลา 4 วัน เมื่อวิเคราะห์ปริมาณเชื้อประกอบด้วย แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ 3.50×10^7 เซลล์ต่อกรัม แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส 1.63×10^9 เซลล์ต่อกรัม แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม 2.40×10^9 เซลล์ต่อกรัม และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช 3.30×10^7 เซลล์ต่อกรัม

3.2.2)การเตรียมปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ส่วนผสมการขยายเชื้อแบบเหลว ประกอบด้วยน้ำกากส่าความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ปรับปริมาตรด้วยน้ำครบ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หลังจากนั้นใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน โดยใช้หัวเชื้อ 0.20 เปอร์เซ็นต์ แล้วเติมออกซิเจนด้วยเครื่องปั๊มออกซิเจนปลาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ตามผลการทดลองที่ 1 ศึกษาการผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว)

3.2.3) การเตรียมไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ส่วนผสมประกอบด้วยไบโอชาร์แกลบ 1 ส่วน ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว 2 ส่วน (อัตราส่วน 1 : 2) ผสมทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ตามผลการทดลองที่ 2) แล้วนำไปใช้ประโยชน์ในแปลง

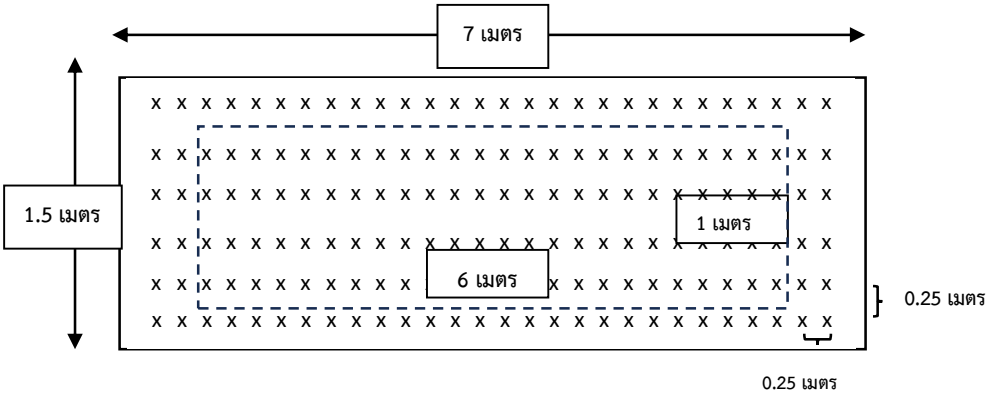
3.2.4) การเตรียมแปลงทดลอง

(1) เตรียมแปลงทดลองขนาด 1.5 x 7 เมตร จำนวนทั้งหมด 21 แปลง ระยะระหว่างแปลง 1 เมตร พื้นที่เก็บข้อมูล 1 x 6 เมตร เว้นพื้นที่ขอบแปลงเป็นแนวแถวป้องกันไม่เก็บข้อมูล

(2) การวางแปลงทดลองตามผังแปลง ดังนี้

Block 1	Block 2	Block 3
T1	T3	T5
T5	T6	T2
T3	T1	T4
T6	T4	T7
T7	T2	T6
T2	T5	T1
T4	T7	T3

ภาพที่ 1 แผนผังแปลงทดลองภาคสนาม



ภาพที่ 2 แสดงระยะปลูก พื้นที่เก็บข้อมูล และพื้นที่เก็บเกี่ยวคะน้าในแปลงย่อย

หมายเหตุ : 1. พื้นที่แปลงย่อยขนาด 1.5 x 7 เมตร

2. X หมายถึง ต้นคะน้าระหว่างต้น 0.25 x 0.25 เมตร

3. ---- หมายถึง ตำแหน่งพื้นที่เกี่ยวเก็บ 1 x 6 เมตร

3.2.5) ปลูกคะน้าพันธุ์ยอด หยอดเป็นหลุมจำนวนแถว 6 แถว ระยะห่างระหว่างต้น 0.25 x 0.25 เมตร เมื่อคะน้าอายุ 10 วัน ถอนแยกเหลือ 1 ต้นต่อหลุม และเก็บเกี่ยวผลผลิตคะน้าที่อายุ 45 วัน ในพื้นที่เก็บเกี่ยว 1 x 6 เมตร จำนวน 96 ต้น

3.2.6) การใส่ปัจจัยการผลิต

การดำเนินงานทดลองในพื้นที่แปลงทดลอง โดยการปลูก 2 ครั้ง ดังนี้ ครั้งที่ 1 ปลูกระหว่างเดือนธันวาคม - มกราคม และครั้งที่ 2 ปลูกระหว่างเดือนเมษายน - พฤษภาคม

(1) การใส่ปัจจัยการทดลอง การปลูกครั้งที่ 1 ดังนี้

ตำรับการทดลองที่ 1 แปลงควบคุมไม่ใส่ปัจจัย

ตำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อคะน้าอายุ 10 วัน ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 22 กิโลกรัมต่อไร่ ปุ๋ยฟอสฟอรัส สูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 11 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยโพแทสเซียม สูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 8 กิโลกรัมต่อไร่ ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 22 กิโลกรัมต่อไร่

ตำรับการทดลองที่ 3

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อคะน้าอายุ 10 วัน ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่ ปุ๋ยฟอสฟอรัส สูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 8.25 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยโพแทสเซียม สูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 6 กิโลกรัมต่อไร่ ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่

- ใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ที่ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ ใส่เพียงครั้งเดียวคลุกเคล้าลงดินให้ทั่วในแปลงก่อนปลูก

ตำรับการทดลองที่ 4

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อคะน้าอายุ 10 วัน ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่ ปุ๋ยฟอสฟอรัส สูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 8.25 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยโพแทสเซียม สูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 6 กิโลกรัมต่อไร่ ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่

- ใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 แบบเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ รดให้ทั่วแปลงก่อนปลูก

ตำรับการทดลองที่ 5

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อคะน้าอายุ 10 วัน ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่ ปุ๋ยฟอสฟอรัส สูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 8.25 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยโพแทสเซียม สูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 6 กิโลกรัมต่อไร่ ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่

- ใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ ใส่เพียงครั้งเดียวคลุกเคล้าลงดินให้ทั่วในแปลงก่อนปลูก

ตำรับการทดลองที่ 6

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อคะน้าอายุ 10 วัน ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่ ปุ๋ยฟอสฟอรัส

สูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 8.25 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยโพแทสเซียม สูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 6 กิโลกรัมต่อไร่ ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่

- ใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ใส่เพียงครั้งเดียวคลุกเคล้าลงดินให้ทั่วในแปลงก่อนปลูก

ตำรับการทดลองที่ 7

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อคะน้าอายุ 10 วัน ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่ ปุ๋ยฟอสฟอรัส สูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 8.25 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยโพแทสเซียม สูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 6 กิโลกรัมต่อไร่ ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่

- ใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ใส่เพียงครั้งเดียวคลุกเคล้าลงดินให้ทั่วในแปลงก่อนปลูก

(2) การใส่ปัจจัยการทดลอง การปลูกครั้งที่ 2 ดังนี้

ตำรับการทดลองที่ 1 - ตำรับการทดลองที่ 4 ใส่ปัจจัยเหมือนการปลูกครั้งที่ 1

ตำรับการทดลองที่ 5

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อคะน้าอายุ 10 วัน ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่ ปุ๋ยฟอสฟอรัส สูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 8.25 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยโพแทสเซียม สูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 6 กิโลกรัมต่อไร่ ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่

- ไม่ใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12

ตำรับการทดลองที่ 6

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อคะน้าอายุ 10 วัน ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่ ปุ๋ยฟอสฟอรัส สูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 8.25 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยโพแทสเซียม สูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 6 กิโลกรัมต่อไร่ ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่

- ไม่ใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12

ตำรับการทดลองที่ 7

- ใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน โดยแบ่งปุ๋ยเคมีใส่ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 เมื่อคะน้าอายุ 10 วัน ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่ ปุ๋ยฟอสฟอรัส สูตร 0 - 46 - 0 อัตรา 8.25 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยโพแทสเซียม สูตร 0 - 0 - 60 อัตรา 6 กิโลกรัมต่อไร่ ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยเคมีห่างจากครั้งแรก 15 วัน ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน สูตร 46 - 0 - 0 อัตรา 16.5 กิโลกรัมต่อไร่

- ไม่ใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12

3.3) การเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1) การเก็บตัวอย่างดิน

การเก็บตัวอย่างดินก่อนการทดลองที่ระดับความลึก 0 - 30 เซนติเมตร โดยสุ่ม 15 จุด และนำมาผสมกันเพื่อส่งวิเคราะห์ และทำการเก็บตัวอย่างดินภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต โดยสุ่มเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 0 - 30 เซนติเมตร จำนวน 3 จุดต่อแปลง และรวมตัวอย่างเป็น 1 ตัวอย่าง นำดิน

ที่เก็บมาจากแปลงทดลอง ไปผึ่งให้แห้งในที่ร่ม จากนั้นบดให้ละเอียดและผสมคลุกเคล้าดินให้สม่ำเสมอ นำดินส่วนที่หนึ่งมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 และ 0.5 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีในห้องปฏิบัติการ

3.3.2) การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน จากการเก็บตัวอย่างดินภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตจากการปลูกครั้งที่ 1 และการปลูกครั้งที่ 2 ดังนี้

(1) ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) วัดโดยใช้ pH meter อัตราส่วนระหว่างดินต่อน้ำเท่ากับ 1 : 1 (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2548)

(2) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) โดยวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายดินที่สกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (saturated extract) วัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสด้วยเครื่อง Electrical conductivity meter (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2548)

(3) ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM) โดยวิธี Walkley and Black Titration (Walkley and Black, 1947)

(4) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Available P) โดยวิธี Bray II (0.1 N HCl+ 0.03N NH_4F) แล้วนำไปวัดค่า absorbance ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 882 นาโนเมตร (Bray and Kurtz, 1945)

(5) ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable K Ca Mg) สกัดดินด้วยสารละลาย 1N NH_4 CH_3COO (pH 7) แล้วนำไปวัดปริมาณด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2548)

3.3.3) การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของดิน

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของดิน จากการเก็บตัวอย่างดินก่อนการทดลองที่ระดับความลึก 0 - 20 เซนติเมตร และจากตัวอย่างดินภายหลังการทดลองสิ้นสุดจากการปลูกครั้งที่ 2 ดังนี้

(1) ค่าความหนาแน่นรวมของดิน (bulk density, D_b) โดยวิธีการเก็บตัวอย่างดินแบบไม่รบกวนโครงสร้าง (undisturbed core method)

(2) ปริมาณน้ำในดิน (field water content) โดยวิธีการคำนวณหาปริมาณน้ำในดินโดยวิธีตู้อบ (onventional oven – method)

3.3.4) การวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียในดิน

การวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียในดิน จากการเก็บตัวอย่างดินก่อนการทดลองและจากตัวอย่างดินภายหลังการทดลองสิ้นสุดจากการปลูกครั้งที่ 2 ดังนี้

(1) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ ทำการแยกเชื้อโดยวีธีการ spread plate บนอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่มีแหล่งไนโตรเจน สูตรอาหาร N - free Burk agar medium โดยวิธี soil dilution plating method selective media

(2) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส ทำการแยกเชื้อจุลินทรีย์โดยวิธีการ spread plate ในอาหาร Pikovskaya’s agar medium บ่มเป็นเวลา 2 - 3 วัน สังเกตวงใสรอบโคโลนี

(3) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม ทำการแยกเชื้อจุลินทรีย์บนอาหารสูตรอาหาร Sucrose minimal salts agar medium ที่มี dihydrogen potassium phosphate เป็น

ส่วนประกอบและมี bromthymol blue ผสมอยู่เพื่อเป็นดัชนีบ่งชี้การผลิตกรดอินทรีย์ของจุลินทรีย์สังเกตการเปลี่ยนสีของอาหารจากสีเขียวเป็นสีเหลือง

(4) วิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนให้พืช โดยใช้วิธี spread plate บนอาหาร Glucose peptone agar บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน

3.3.5) การเก็บข้อมูลด้านการเจริญเติบโตและผลผลิตพืช

(1) ความสูงต้น ที่อายุเก็บเกี่ยว 45 วัน โดยวัดจากพื้นดินถึงปลายใบที่ยาวที่สุด จำนวน 96 ต้นต่อแปลงย่อย แล้วหาค่าเฉลี่ย

(2) ค่าความเขียวของใบ (SPAD reading) ที่อายุเก็บเกี่ยว 45 วัน โดยวัดตำแหน่งใบที่ 2 - 3 จากปลายยอด จำนวน 96 ต้นต่อแปลงย่อย แล้วหาค่าเฉลี่ย

(3) ค่าขนาดพื้นที่ใบ วัดด้วยเครื่องวัดพื้นที่ใบ ที่อายุเก็บเกี่ยว 45 วัน โดยวัดตำแหน่งใบที่ใหญ่ที่สุดของแต่ละต้น จำนวน 96 ต้นแปลงย่อย แล้วหาค่าเฉลี่ย

(4) น้ำหนักสด ที่อายุเก็บเกี่ยว 45 วัน

(5) น้ำหนักแห้งของต้นคะน้า แยกใส่ซองกระดาษที่สะอาดนำมาชั่งน้ำหนักสดของต้นคะน้า แล้วนำเข้าเครื่องอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 วัน เพื่อหาน้ำหนักแห้งของต้นคะน้า

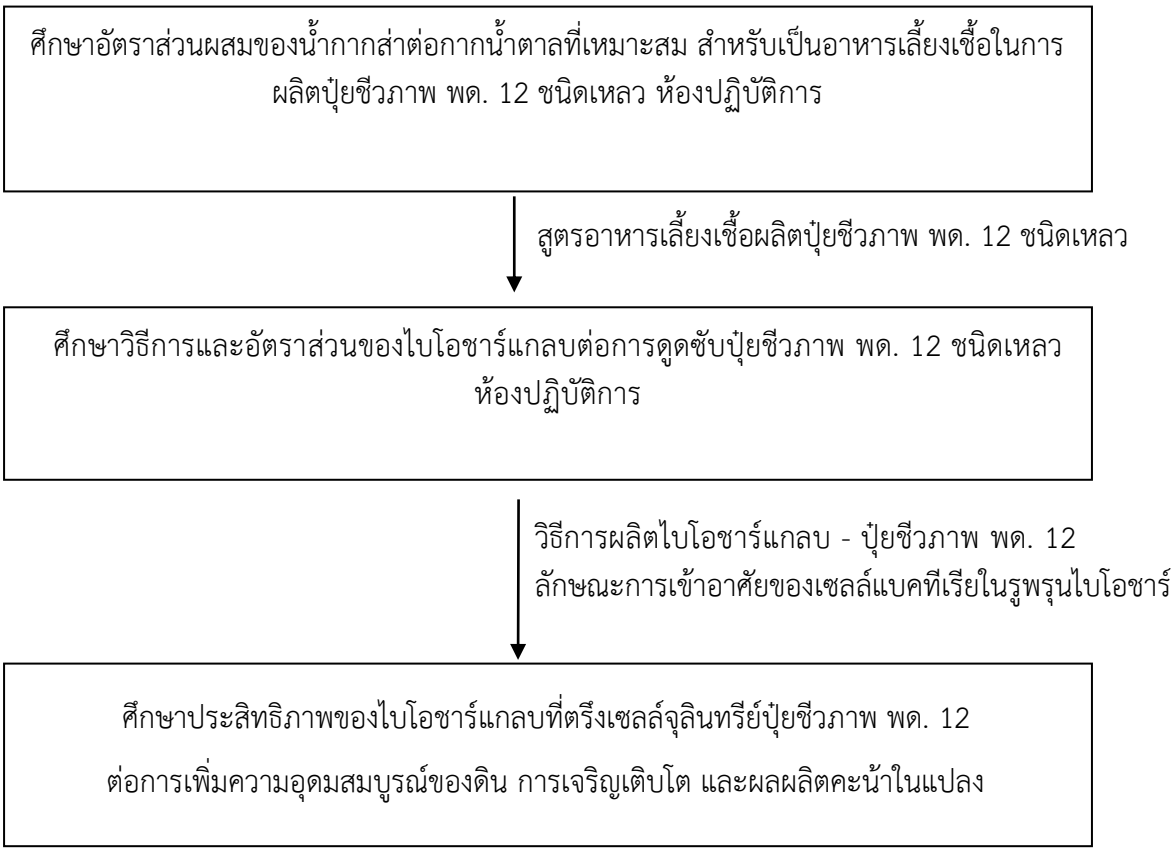
3.3.6) การวิเคราะห์ธาตุอาหารพืชในต้นคะน้า ได้แก่ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด

3.3.7) เก็บข้อมูลผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการผลิตพืช เช่น ค่าวัตถุดิบ ค่าแรง

3.3.8) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของข้อมูลโดยใช้วิธี Duncan’s New Multiple Range Test

แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย



บทที่ 2
ข้อมูลทั่วไป

2.1 คะน้า

คะน้า (*Brassica oleracea*) เป็นพืชผักใบเขียวที่รับประทานทั่วไป โดยบริโภคส่วนของใบและ ลำต้น มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปเอเชียและปลูกกันมากในประเทศจีน ฮ่องกง ไต้หวัน มาเลเซีย และประเทศไทย ผักคะน้าเป็นผักอายุ 2 ปี แต่ปลูกเป็นผักฤดูเดียวอายุเก็บเกี่ยวประมาณ 45 - 55 วัน (สุดชล, 2555)

1) ปริมาณธาตุอาหารกับคุณภาพผักคะน้า (ยงยุทธ และคณะ, 2551)

การเจริญเติบโตนับตั้งแต่เริ่มงอกจากเมล็ดจนถึงระยะเก็บเกี่ยว ผักกินใบ 5 ชนิดที่เก็บเกี่ยวจากพื้นที่ 1 ไร่ มีไนโตรเจนติดไปด้วย 2.86 - 11.27 กิโลกรัมต่อไร่ ฟอสฟอรัส 0.49 - 2.00 กิโลกรัมต่อไร่ โพแทสเซียม 4.97 - 27.40 กิโลกรัมต่อไร่ แคลเซียม 0.90 - 5.97 กิโลกรัมต่อไร่ แมกนีเซียม 0.40 - 1.31 กิโลกรัมต่อไร่ และกำมะถัน 0.29 - 2.13 กิโลกรัมต่อไร่ เมื่อพิจารณาธาตุที่สะสมในผลผลิต 1 ตัน มีธาตุอาหารติดไป ดังนี้ คือ ไนโตรเจน 0.5 - 2.7 กิโลกรัม (N) ฟอสฟอรัส 0.2 - 1.7 กิโลกรัม (P) โพแทสเซียม 1.7 - 2.8 กิโลกรัม (K) แคลเซียม 0.3 - 1.1 กิโลกรัม (Ca) แมกนีเซียม 0.2 - 0.6 กิโลกรัม (Mg) และกำมะถัน 0.1 - 0.2 กิโลกรัม (S)

2) ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของคะน้า

สำหรับความเข้มของธาตุอาหารที่เพียงพอและเหมาะสมของธาตุหลัก ธาตุรอง และจุลธาตุในใบดัชนีของคะน้าที่ระยะใกล้เก็บเกี่ยว พิสัยความเข้มข้นของธาตุหลัก ได้แก่ ปริมาณไนโตรเจน 4.0 – 5.0 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง ปริมาณฟอสฟอรัส 0.3 – 0.6 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง ปริมาณโพแทสเซียม 3.0 – 4.0 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง พิสัยความเข้มข้นของธาตุรอง ได้แก่ ปริมาณแคลเซียม 3.0 – 4.0 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง และพิสัยความเข้มข้นของจุลธาตุ ได้แก่ ปริมาณโบรอน 50 - 60 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง

3) ความต้องการปุ๋ยตามคำแนะนำตามผลวิเคราะห์ธาตุอาหารพืช สำหรับปุ๋ยเคมีที่แนะนำให้ใช้มี 2 แบบ คือ พิจารณาจากผลการวิเคราะห์ดินและเนื้อดิน

3.1) คำแนะนำตามผลการวิเคราะห์ดิน การใช้ปุ๋ยธาตุหลักประกอบด้วยอัตรา 10 - 20 กิโลกรัมของ N ต่อไร่ อัตรา 5 - 10 กิโลกรัมของ P_2O_5 ต่อไร่ และอัตรา 5 - 15 กิโลกรัมของ K_2O ต่อไร่ ตามระดับของปริมาณอินทรียวัตถุ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

3.2) คำแนะนำตามลักษณะเนื้อดิน ใช้อัตราเดียวกัน คือ ก) ดินเหนียวใส่อัตรา 7.5 กิโลกรัมของ N ต่อไร่ อัตรา 7.5 กิโลกรัมของ P_2O_5 ต่อไร่ และอัตรา 7.5 กิโลกรัมของ K_2O ต่อไร่ ซึ่งได้แก่ ปุ๋ยเคมีสูตร 15 - 15 - 15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ ข) ดินร่วนใส่อัตรา 12 กิโลกรัมของ N ต่อไร่ อัตรา 6 กิโลกรัมของ P_2O_5 ต่อไร่ และอัตรา 6 กิโลกรัมของ K_2O ต่อไร่ ซึ่งได้แก่ ปุ๋ยเคมีสูตร 20 - 10 - 10 อัตรา 60 กิโลกรัมต่อไร่ และ ค) ดินทรายใส่อัตรา 15 กิโลกรัมของ N ต่อไร่ อัตรา 10 กิโลกรัมของ P_2O_5 ต่อไร่ และอัตรา 10 กิโลกรัมของ K_2O ต่อไร่ ซึ่งได้แก่ ปุ๋ยเคมีสูตร 15 - 10 - 10 อัตรา 100 กิโลกรัมต่อไร่ สำหรับวิธีใส่นั้นให้แบ่งปุ๋ยออกเป็นสองส่วนเท่า ๆ กัน ครึ่งแรกใส่หลังจากถอนแยก และครั้งที่สองใส่หลังจากครั้งแรกสองสัปดาห์

2.2. สมบัติดินในพื้นที่ศึกษา (กรมพัฒนาที่ดิน, 2557; กรมพัฒนาที่ดิน, 2562ก) ดังนี้

ชุดดินปราณบุรี (Pr) กลุ่มชุดดินที่ 36

การจำแนกดิน (USDA) Fine-loamy, mixed, semiactive, isohyperthermic Ultic Paleustalfs

วัตถุต้นกำเนิด ตะกอนน้ำพา

สภาพพื้นที่ ค่อนข้างราบเรียบถึงลูกคลื่นลอนลาดเล็กน้อยความลาดชัน 1 - 5 %

การระบายน้ำ ดี

การซึมผ่านได้ของน้ำ ปานกลางถึงดี

การไหลบ่าของน้ำบนผิวดิน ปานกลาง

ลักษณะสมบัติของดิน เป็นกลุ่มชุดดินที่เกิดจากวัตถุต้นกำเนิดดินพวกตะกอนลำน้ำ หรือการสลายตัวผุพังอยู่กับที่ หรือการสลายตัวผุพังแล้วถูกเคลื่อนย้ายมาทับถม ของวัสดุเนื้อหยาบ พบบริเวณพื้นที่ดอน ที่มีสภาพพื้นที่เป็นลูกคลื่นลอนลาดจนถึงเนินเขา เป็นดินลึก มีการระบายน้ำดีถึงดีปานกลาง มีเนื้อดินเป็นพวกดินร่วนละเอียดที่มีเนื้อดินบนเป็นดินร่วนปนทราย หรือดินร่วน ส่วนดินล่างเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย หรือดินร่วนเหนียว ดินมีสีน้ำตาล สีเหลืองหรือสีแดง และอาจพบจุดประสีต่าง ๆ ในชั้นดินล่าง ดินมีความอุดมสมบูรณ์ตามธรรมชาติค่อนข้างต่ำถึงปานกลาง ดินชั้นบนส่วนใหญ่จะมีปฏิกิริยาเป็นกรดจัดถึงเป็นกลาง ส่วนดินล่างจะมีปฏิกิริยาดินเป็นกรดปานกลางถึงเป็นด่างปานกลาง

ความอุดมสมบูรณ์ ต่ำถึงปานกลาง

บทที่ 3
ตรวจเอกสาร

3.1 ไบโอชาร์ (biochar

3.1.1 ไบโอชาร์ (biochar) หรือถ่านชีวภาพ

1) ไบโอชาร์ คือ ถ่านที่มีลักษณะเป็นเนื้อละเอียดและเต็มไปด้วยรูพรุน เป็นวัสดุอินทรีย์ที่อุดมด้วยคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการเผาไหม้ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและอากาศ เรียกว่า การแยกสลายด้วยความร้อน หรือกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน หรือมีออกซิเจนน้อยมาก (Rawat *et al*., 2019) มี 2 วิธีการ คือ การแยกสลายด้วยความร้อนแบบช้า (slow pyrolysis) คือ การเผาไหม้ด้วยการแยกสลายสารอินทรีย์แบบช้า ๆ ใช้ระยะเวลาเป็นชั่วโมง และใช้อุณหภูมิระหว่าง 350 - 600 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน และการแยกสลายด้วยความร้อนแบบเร็ว (fast pyrolysis) ที่ใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้เป็นวินาที ใช้อุณหภูมิในการเผาตั้งแต่ 500 - 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งทั้ง 2 วิธีการนี้ จะได้ผลผลิตที่แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ น้ำมัน หรือน้ำส้มควันไม้ แก๊สสังเคราะห์ และไบโอชาร์ (Tomczyk *et al.,* 2020; Verheijen *et al*., 2010; พินิจภณ, 2558) สามารถใช้วัสดุหลากหลายประเภท เช่น เศษไม้ ซังข้าวโพด แกลบ ฟางข้าว เปลือกถั่ว มูลสัตว์ หรือผักผลไม้ ซึ่งชนิดวัสดุและกระบวนการไพโรไลซิส มีผลโดยตรงต่อรูพรุน และเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัว (Gwenzi *et al*., 2018; ประไพพิศ และคณะ, 2557)

2) การผลิตไบโอชาร์ ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้

2.1) ช่วงก่อนไพโรไลซิส (pre-pyrolysis) เป็นช่วงที่เริ่มเผาซึ่งมีอุณหภูมิปกติจนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 200 องศาเซลเซียส ช่วงนี้มีการระเหยของความชื้น และสารประกอบบางชนิดในวัตถุดิบ เนื่องจากมีการทำลายพันธะทางเคมีของกลุ่มไฮโดรเปอร์ดรอกไซด์ (-ROOH) กลุ่มคาร์บอกซิล (-COOH) และกลุ่มคาร์บอนิล (-CO) (Cardenas-Aguiar *et al*., 2017)

2.2) ช่วงไพโรไลซิสหลัก (main-pyrolysis) เป็นช่วงที่อุณหภูมิการเผาอยู่ระหว่าง 200 – 500 องศาเซลเซียส ในช่วงนี้สารประกอบเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีการสลายตัวอย่างรวดเร็ว โดยปกติมักจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 200 – 260 องศาเซลเซียส (Ding *et al*., 2014)

2.3) ช่วงสร้างวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก (formation of carbonaceous products) ซึ่งอุณหภูมิอาจจะน้อย หรือมากกว่า 500 องศาเซลเซียส สารประกอบที่มีพันธะทางเคมีแข็งแรง อาทิ ลิกนิน จะเริ่มสลายตัวในช่วงนี้ (Lee *et al*., 2017) จากการศึกษาอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับโครงสร้างและสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของถ่าน เมื่ออุณหภูมิการเผาเพิ่มสูงขึ้น พื้นที่ผิว สัดส่วนของคาร์บอน ความเป็นกรดเป็นด่าง และสารระเหยบางชนิดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกและหมู่ฟังก์ชันบางชนิดบนพื้นผิวลดลง (Asadullah *et al.,* 2007; Jindo *et al.,* 2014)

3.1.2 การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์ทางการเกษตร

ไบโอชาร์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ มีสมบัติทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกัน (ประไพพิศ และคณะ, 2557) และไบโอชาร์มีอิทธิพลต่อสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของดิน และต่อปฏิกิริยากับประจุบวก ประจุลบ และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ ในดิน (Zhu *et al*., 2017) จากรายงานของ Xueyong *et al*. (2018) พบว่า การใช้ไบโอชาร์ในการปรับปรุงบำรุงดินมีความสัมพันธ์กับอนุภาคดินเหนียว อนุภาคทราย

แป้ง อินทรียวัตถุในดิน รวมถึงความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน (Revell *et al*., 2012) ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (Xu *et al*., 2012) ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Alburquerque *et al*., 2014) ความหนาแน่นรวม (Cabeza *et al*., 2018) และพื้นที่ผิวจำเพาะของไบโอชาร์ (Tomczyk *et al*., 2020) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ จำเป็นต่อการนำไบโอชาร์ไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงบำรุงดินเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน

1) การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์ต่อการปรับปรุงสมบัติทางเคมีดิน

1.1) การดูดซับธาตุอาหาร ไบโอชาร์มีศักยภาพในการดูดซับธาตุอาหาร (Gwenzi *et al*., 2018) เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสทำให้ผลิตภัณฑ์ไบโอชาร์เป็นผลึกคาร์บอนที่มีรูพรุนสูง ทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคดินเหนียวมากกว่า 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม คุณสมบัตินี้ทำให้ไบโอชาร์มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลทั้งที่ประจุบวกและประจุลบของสารอาหารของพืช และโมเลกุลของน้ำ (Atkinson *et al.,* 2010) ความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารมีความเกี่ยวข้องอย่างสูงกับสมบัติของไบโอชาร์ ซึ่งประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันกรดบนพื้นผิว และการแลกเปลี่ยนไอออน (Tomczyk *et al*., 2020) ดังนั้นกลไกในการดูดซับธาตุอาหาร สามารถอธิบายได้จากความสามารถในการดูดซับของสารที่เป็นขั้วและไม่เป็นขั้วจะเกี่ยวข้องกับการดูดซับทางเคมี ซึ่งประกอบด้วย hydrophobicbonding, **π**-**π** electron donor-acceptor interactions ที่เกิดจากโครงสร้างแอโรแมติกที่หลอมเชื่อมกัน และพันธะไฮโดรเจนที่ไม่ปกติแบบอ่อน (Ding *et al*., 2010) โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของธาตุ Ca^{2} Mg^{2+} และ K^{+} เพิ่มขึ้นภายหลังจากการใส่ไบโอชาร์ลงดิน เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนของธาตุประจุบวกที่เป็นด่างระหว่างไบโอชาร์กับ Al^{3+} ที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน (Yuan and Xu, 2011) ปริมาณการเพิ่มขึ้นของธาตุประจุบวกแต่ละชนิดในดินขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุประจุบวกแต่ละชนิดในไบโอชาร์ และจากคุณสมบัติของไบโอชาร์มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง จากการแยกตัวของกลุ่มฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวของไบโอชาร์ บ่งชี้ถึงการเพิ่มความสามารถในการกักเก็บธาตุไอออนบวก เช่น Ca^{2+} Mg^{2+} K^{+} และ NH^{4+} (Alling *et al*., 2014; Cheng *et al*., 2018) ดังนั้นการใช้ไบโอชาร์ช่วยในการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินได้ โดยการทำให้ดินสามารถกักเก็บธาตุอาหารได้ และลดการสูญเสียธาตุอาหารจากการชะล้าง นอกจากคุณสมบัติในการดูดซับธาตุอาหารยังมีรายงานการวิจัยการใช้ไบโอชาร์เป็นปุ๋ยปลดปล่อยช้า (slow-release fertilizer) (Wang *et al.,* 2022) จากสมบัติของไบโอชาร์ในการคายการดูดซับธาตุอาหารได้ เนื่องจากมีกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับแร่ธาตุอาหาร การควบคุมความเข้มข้นของธาตุอาหารในดิน การเพิ่มธาตุอาหารในระบบชีวภาพ โดยต้องพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหาร เช่น ชนิดของดิน วัตถุดิบ สภาวะไพโรไลซิส และการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์ด้วย มีงานวิจัยรายงานว่าดินดำที่ผสมไบโอชาร์ 0 1 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ จะปลดปล่อยธาตุฟอสฟอรัสได้เท่ากับ 36 37 39 และ 41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า การประยุกต์ใช้ไบโอชาร์ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 องศาเซลเซียส สามารถปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่ 32 28 และ 69 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Ding *et al*., 2010)

1.2) ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ไบโอชาร์มีคุณสมบัติทางเคมีที่มีความเป็นด่าง คุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุอินทรีย์ที่นำมาใช้ผลิตจากเศษวัสดุทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ไม้ไผ่ กะลามะพร้าว แกลบ ไม้ยูคาลิปตัส และไม้ลิ้นจี่ ที่ผลิตโดยวิธีไพโรไลซิสมีสมบัติเป็นด่าง พีเอช 7.5 - 10.4 (ประไพพิศ และคณะ, 2557) รายงานของ Yuan and Xu (2011) พบว่าไบโอชาร์ที่ผลิตจากฟางข้าว ข้าวโพด ถั่วลิสง และถั่วเหลือง โดยการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีผล

ให้ไบโอชาร์ค่าพีเอช 9.4 8.6 และ 7.7 ตามลำดับ ซึ่งในกระบวนการผลิตไบโอชาร์จากการใช้ความร้อน หรือกระบวนการไพโรไลซิส จะทำให้หมู่ฟังก์ชันที่แสดงความเป็นกรดถูกกำจัดออก เช่น หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl) ไฮดรอกซิล (hydroxyl) หรือฟอร์มิล (formyl) เป็นต้น (Weber and Quicker, 2018) ซึ่งไบโอชาร์มีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชของดิน (soil pH buffering capacity: pHBC) เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดความเป็นกรดของดิน (Brady and Weil, 2021) จากรายงานวิจัยการปรับความเป็นกรดของดินด้วยการใช้ปูนเปรียบเทียบกับการใช้ไบโอชาร์ พบว่า ไบโอชาร์สามารถแก้ไขความเป็นกรดของดิน และยังช่วยเพิ่มค่าความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชของดิน อีกทั้งช่วยยับยั้งการกลับมาเป็นกรดของดินอีกด้วย (Xu *et al*., 2012; Shi *et al*., 2017) และมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะในดินที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกต่ำ (Shi *et al.,* 2018) จากรายงานการใช้ไบโอชาร์จากฟางข้าวและถั่วลิสง ทำให้ดินมีค่าความสามารถการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชของดินเพิ่มขึ้น 85 – 200 เปอร์เซ็นต์ หลังจากการใช้ไบโอชาร์ลงในดิน (Shi *et al*., 2017) มีรายงานการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์จากเศษซากของพืชตระกูลถั่ว สามารถเพิ่มพีเอชของดิน ส่งผลให้ผลผลิตพืชเพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์ (Jeffery *et al*., 2017) และการใส่ไบโอชาร์แกลบลงในดินกรดมีผลให้สมบัติของดินมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินเพิ่มขึ้นมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 6.9 - 7.7 สูงกว่าดินก่อนการทดลอง มีค่าพีเอช 5.8 (บรรเจิดลักษณ์ และ รติกร, 2560) อีกทั้งการใส่ไบโอชาร์ลงไปในดิน ทำให้ด่างประจุบวกของฟอสฟอรัสและไนโตรเจนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยปกติค่าความเป็นด่าง และองค์ประกอบอนินทรีย์ของไบโอชาร์ เช่น ปริมาณเถ้า ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน โพแทสเซียม และธาตุอาหารรองอื่น ๆ เป็นประโยชน์ทางการเกษตรทั้งในระยะสั้นถึงระยะยาว เมื่อไบโอชาร์ที่มีพีเอชสูงถูกนำไปใช้กับดินจะช่วยลดความเป็นกรดของดิน ซึ่งช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารได้ (Karhu *et al.,* 2011) อีกทั้งดินที่มีส่วนผสมไบโอชาร์ เช่น ไบโอชาร์จากฟางข้าวและถั่วลิสง ยังช่วยยับยั้งการเพิ่มขึ้นของ Al^{3+} ที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน (Shi *et al.* 2018) โดยปกติ Al^{3+} ที่แลกเปลี่ยนได้ในดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรดของดินลดลง แต่เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชของดิน และความต้านทานต่อการเป็นกรดจากการใส่ไบโอชาร์จะช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของ Al^{3+} ที่แลกเปลี่ยนได้ในดินกรด และผลการยับยั้งการเพิ่ม Al^{3+} ที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไบโอชาร์ ชี้ให้เห็นว่า พื้นผิวของไบโอชาร์สามารถจับกับอะลูมินัมและช่วยลด Al^{3+} ที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน (Qian *et al.,* 2013)

1.3) การเพิ่มอินทรีย์คาร์บอนและอินทรียวัตถุของดิน ไบโอชาร์เป็นวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอนผลิตจากมวลชีวภาพ สามารถเพิ่มแหล่งอินทรีย์คาร์บอนที่มีความเสถียรสูงเพื่อการกักเก็บคาร์บอนในดิน ช่วยปรับปรุงดิน และเพิ่มผลผลิตทาง การเกษตร เนื่องจากเมื่อนำไบโอชาร์ลงดิน ลักษณะความเป็นรูพรุนของไบโอชาร์ จะช่วยกักเก็บน้ำ ธาตุอาหารในดิน และเป็นที่อยู่ให้กับจุลินทรีย์สำหรับทำกิจกรรมเพื่อสร้างธาตุอาหารให้ดิน เมื่อดินอุดมสมบูรณ์จะส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรเพิ่มขึ้น การใส่ไบโอชาร์ยังช่วยเพิ่มคาร์บอนให้กับดิน ป้องกันการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสารชีวภาพขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ และช่วยให้พืชดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างช้า ๆ ในขณะที่พืชสังเคราะห์แสง เพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของพืชให้ดีขึ้น ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดี มีคุณภาพผลผลิตที่ดีขึ้น (Uvarov, 2000) จากรายงานของชฎาภา (2564) การใส่ไบโอชาร์แกลบ 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยเคมี 100 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการปลูกข้าวแบบขังน้ำของดินร่วนเหนียวปนทราย ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของการสะสมปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด 2.02 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนของดิน 1.85 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณอินทรียวัตถุของดิน 3.19 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าดินก่อนการทดลอง นอกจากนี้ก่อให้เกิดการสะสมของอินทรียวัตถุในดิน และการเปลี่ยนแปลง pH ของดิน (จากกรดให้เป็นกลาง) และยังพบการตรึงไนโตรเจนในสภาพน้ำขัง (Kirk, 2004) เช่นเดียวกับรายงานของ

เกศศิรินทร์ และคณะ (2558) การใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 1,000 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มการสะสมอินทรียวัตถุในดินสูงมากกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์อย่างมีนัยสำคัญ การใส่ไบโอชาร์ร่วมกับปุ๋ยเคมีในการปลูกข้าวไร่มีผลทำให้ดินมีปริมาณอินทรียวัตถุเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว (จิตนิภา, 2558) และการใส่ไบโอชาร์ร่วมกับการจัดการปุ๋ย ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของผลผลิต ความเข้มข้นธาตุอาหารในพืช และอินทรียวัตถุของดินสูงกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์ (สายชล และคณะ, 2563) อีกทั้งในพื้นที่ดินกรดการใช้ไบโอชาร์อัตรา 500 - 3,000 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มผลผลิตพืชผักอินทรีย์ในพื้นที่ดินกรด และปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (บรรเจิดลักษณ์ และ รติกร, 2560) ไบโอชาร์เป็นอินทรีย์คาร์บอนเป็นรูปที่มีเสถียรภาพ แม้ว่าจะสลายตัวเล็กน้อยในช่วงแรก แต่ส่วนที่เหลือจะทนทานต่อการย่อยสลายด้วยกระบวนการจุลินทรีย์ (Major *et al*., 2010)

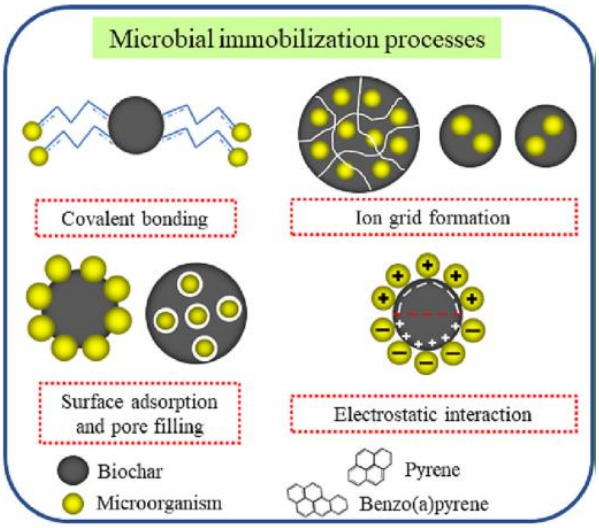
2) การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์ต่อการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน

ไบโอชาร์เป็นวัสดุอินทรีย์ที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากชีวมวล หรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ หรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น ใบไม้ กิ่งไม้ หญ้า ฟางข้าว เหง้ามันสำปะหลัง ซัง และต้นข้าวโพด มูลสัตว์ กากตะกอนของเสีย เป็นต้น การผลิตไบโอชาร์ด้วยวิธีการแยกสลายอย่างช้า มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการผลิตไบโอชาร์ เนื่องจากได้ผลผลิตประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งมวลชีวภาพ (Abdelhafez *et al*., 2017) มีการใช้ประโยชน์ไบโอชาร์ในการกักเก็บคาร์บอนในรูปอินทรีย์คาร์บอนคงตัวสูง และปรับปรุงดิน เนื่องจากมีคุณสมบัติรูพรุนตามธรรมชาติช่วยให้สามารถอุ้มน้ำ รวมถึงเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นตัวสร้างอาหารในดิน การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน เช่น ไบโอชาร์ที่ผลิตจากแกลบ มีความชื้น 4.96 เปอร์เซ็นต์ มีค่าพีเอช 8.7 ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน 17.57 เซนติโมลต่อกิโลกรัม เมื่อใส่ลงดินทำให้ลดความหนาแน่นรวมของดินลดลง มีค่าความพรุน ความชื้น ปริมาณคาร์บอน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และแคลเซียมในดินเพิ่มขึ้น (Masulili *et al*., 2010) ทั้งนี้ ดินที่ใส่ไบโอชาร์มีค่าความสามารถในการนำน้ำในสภาพที่อิ่มตัว เพิ่มขึ้นถึง 88 เปอร์เซ็นต์ สีของดินมีสีคล้ำขึ้น ค่าความหนาแน่นรวมของดินลดลง 9 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความพรุนเพิ่มขึ้นจาก 45.70 เปอร์เซ็นต์ เป็น 50.60 เปอร์เซ็นต์ (Oguntunde *et al.,* 2008) อีกทั้งการใส่ไบโอชาร์ที่อัตรา 3 ตันต่อไร่ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของเม็ดดิน มีขนาดเม็ดดินใหญ่ที่สุด 4.11 มิลลิเมตร อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบไบโอชาร์ 500 กิโลกรัมต่อไร่ มีขนาดเม็ดดินเท่ากับ 3.53 มิลลิเมตร และไม่ใส่ไบโอชาร์ ซึ่งมีขนาดเม็ดดินเล็กที่สุดเท่ากับ 3.06 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่า วัสดุอินทรีย์ชักนำให้เกิดเม็ดดินขนาดใหญ่ เนื่องจากวัสดุอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนที่ก่อให้เกิดกิจกรรมจุลินทรีย์ในการสร้างสารเชื่อมเม็ดดิน (Six *et al.,* 2002) ประกอบกับการศึกษาด้วยไอโซโทปตรวจจับคาร์บอนของ Angers and Recous (1997) และ Tang *et al*. (2011) พบว่า เม็ดดินขนาดเล็กถูกสร้างอยู่ในเม็ดดินขนาดใหญ่ ดินที่มีคาร์บอนน่าจะเกิดการสร้างเม็ดดินขนาดใหญ่ได้มาก และเม็ดดินขนาดเล็กจะมีปริมาณน้อยลง เพราะส่วนมากถูกกลไกการสร้างตัวของเม็ดดินโดยการเชื่อมตัวของเม็ดดินขนาดเล็กไปอยู่ในเม็ดดินขนาดใหญ่

3) การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์ต่อการปรับปรุงสมบัติทางชีวภาพของดิน

ไบโอชาร์ที่ผลิตได้จะมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้นจาก 7.6 เป็น 9.7 (Lehmann *et al.,* 2011) โดยไบโอชาร์ที่ผลิตภายใต้สภาพอุณหภูมิต่ำมีค่าความจุแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง ในขณะที่ถ่านที่ผลิตในสภาพอุณหภูมิสูงมากกว่า 600 องศาเซลเซียส จะมีค่าความจุแลกเปลี่ยนประจุบวกต่ำ และไบโอชาร์ที่ผลิตจากวัสดุที่แตกต่างกันก็มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพการใช้แตกต่างกัน (Lehmann, 2007) โดย Saranya *et al*. (2011) ได้ศึกษาวิจัยการใช้ไบโอชาร์จากต้นอาคาเซียที่มาจากอินเดียกับสหรัฐอเมริกา พบว่า ไบโอชาร์จากไม้อาคาเซียจากสหรัฐอเมริกามีประสิทธิภาพในการเป็นวัสดุรองรับเชื้อ *Azospirillum lipoferum* สูงกว่าไบโอชาร์ที่ผลิต

จากไม้อาคาเซียจากดินเดีย ไบโอชาร์มีศักยภาพในการเป็นวัสดุรองรับจุลินทรีย์ได้เท่าเทียมกับ เวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) ลิกไนต์ (lignite) พีทมอส (peat moss) และปุ๋ยหมัก (Lauren and Crowley, 2014; Bashan, 1998) อีกทั้งการตรึงเซลล์จุลินทรีย์เป็นเทคโนโลยีชีวภาพที่จุลินทรีย์ถูกตรึงอยู่ในพื้นที่เฉพาะ โดยการตรึงเซลล์ด้วยวิธีต่าง ๆ เพื่อรักษากิจกรรมของจุลินทรีย์โดยธรรมชาติ (Karel *et al*., 1985) และกลไกการตรึงจุลินทรีย์ด้วยไบโอชาร์จากกระบวนการตรึงจุลินทรีย์โดยการเกาะบนพื้นผิวและรูพรุน ผ่านการดูดซับ ปฏิกิริยาระหว่างไฟฟ้าสถิต การสร้างกรดไอออน และการจับโควาเลนต์ (Liu *et al.,* 2020; Vasilieva *et al.,* 2021; Zhang *et al.,* 2014) โดยการดูดซับพื้นผิวและการช่องว่างของรูพรุนขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของแรงที่ไม่จำเพาะ เช่น การยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของถ่านไบโอชาร์ และจุลินทรีย์กลุ่มฟังก์ชัน (เช่น -OH และ -COOH) (Wu *et al.,* 2022) จุลินทรีย์มีแนวโน้มที่จะเกาะติดกับวัสดุพาหะโดยการผลิตสารยึดเกาะ ที่เรียกว่า โพลีเมอร์ นอกเซลล์ ซึ่งช่วยให้จุลินทรีย์เติบโต และแพร่กระจายได้ทั่วทั้งพื้นผิว และรูพรุนด้านในของวัสดุพาหะ (Li *et al*., 2022) กระบวนการตรึงเซลล์จุลินทรีย์ด้วยไบโอชาร์สามารถรักษาสภาพเซลล์จุลินทรีย์โดยธรรมชาติ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรและสิ่งแวดล้อม ดังภาพที่ 3 (Yang *et al.,* 2020a, 2020b) จากรายงานของ Chen *et al*. (2021) การใช้ไบโอชาร์เป็นตัวพาในการตรึง *Bacillus cereus* WHX-1 เพื่อฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโครเมียม (Cr(VI)) จากการวิเคราะห์โดย SEM และ FTIR พบว่า พื้นผิวที่หยาบและมีรูพรุนของถ่านไบโอชาร์เป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์ และลดการสูญเสียจุลินทรีย์ในดิน อีกทั้งช่วยรักษากิจกรรมของจุลินทรีย์ และเพิ่มประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในดิน การใช้ไบโอชาร์ในการตรึงเซลล์แบคทีเรียที่ละลายฟอสฟอรัส *Pseudomonas* sp. เมื่อใส่ลงในดินสามารถส่งเสริมการเพิ่มมวลชีวภาพของข้าวโพด และกระตุ้นการงอกเร็วขึ้น และไบโอชาร์จะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาหัวเชื้อ *Pseudomonas* sp. ได้นานมากกว่าหัวเชื้อที่ใส่ในพีทมอสเป็นวัสดุรองรับ (Glodowska *et al*., 2016) อีกทั้งพบว่า จุลินทรีย์ละลายฟอสฟอรัสทั้งกลุ่มแบคทีเรียและเชื้อรา สามารถคงความหนาแน่นของเชื้อในการจัดเก็บรักษาสูงบนไบโอชาร์แกลบ ซึ่งถ่านไบโอชาร์มีศักยภาพสูงสุดในการเก็บรักษาจำนวนประชากรเชื้อได้นานมากกว่า 6 เดือน (Husna *et al*., 2019) และรายงานของ Steinbeiss *et al*. (2009) พบว่า การใช้ถ่านไบโอชาร์ช่วยเพิ่มปริมาณของยีสต์ ซึ่งยีสต์จะช่วยสนับสนุนให้มีเชื้อราในดินเพิ่มมากขึ้น ขณะที่กลูโคสในถ่านไบโอชาร์จะช่วยขยายปริมาณของแบคทีเรียแกรมลบ และการเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์ยังต้องขึ้นกับชนิดของไบโอชาร์ ชนิดดิน และปริมาณของถ่านไบโอชาร์ในดิน ซึ่งการใช้ประโยชน์ไบโอชาร์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสจะช่วยยืดอายุการอยู่รอดของ *Burkholderia sp.* และ *Bacillus sp.* ในการเก็บรักษา อีกทั้งเป็นการปรับปรุงดินจากการใช้ประโยชน์ของไบโอชาร์ และจุลินทรีย์เพิ่มความเป็นประโยชน์ธาตุอาหารในดินสามารถส่งเสริมชีวมวลและผลผลิตพืช (Kumar *et al*., 2017) จากรายงานของ Yao *et al. (*2012) พบว่า ไบโอชาร์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพจุลินทรีย์ในการตรึงไนโตรเจนทางชีวภาพของพืชตระกูลถั่ว และจากการประยุกต์ใช้ไบโอชาร์ร่วมกับเชื้อราที่ย่อยสลายฟอสฟอรัสลงไปในดิน จะส่งเสริมการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชหลายชนิด เช่น ถั่วเหลือง และถั่วเขียว เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ที่ไม่มีการใช้ไบโอชาร์ (Xu *et al*., 2012) การใช้ไบโอชาร์ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของเชื้อราไมคอร์ไรซาในพืชตระกูลถั่วโคลเวอร์ โดยทำให้ดินบริเวณรากพืชเหมาะสมสำหรับการอยู่อาศัย (Zheng *et al.,* 2012) เนื่องจากไบโอชาร์มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน ส่งผลทางอ้อมต่อเชื้อราไมคอร์ไรซาผ่านกิจกรรมของจุลินทรีย์อื่น ๆ ในดิน และเป็นที่พักพิงอาศัยให้เชื้อราชนิดอื่น ๆ (Cowie *et al*., 2012)



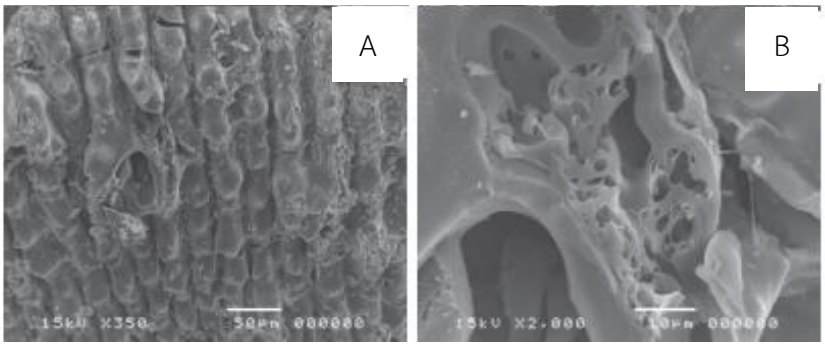
ภาพที่ 3 กระบวนการตรึงเซลล์จุลินทรีย์ด้วยไบโอชาร์ (Yang *et al.,* 2020a, 2020b)

3.1.3 ไบโอชาร์แกลบ

1) คุณสมบัติทางเคมีของไบโอชาร์แกลบ

คุณสมบัติทางเคมีของไบโอชาร์แกลบประกอบด้วยความชื้น 0.20 เปอร์เซ็นต์ สารระเหย 29.87 เปอร์เซ็นต์ เถ้า 37.63 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนคงตัว 32.30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อแยกวิเคราะห์ธาตุของชีวมวลไบโอชาร์แกลบมีองค์ประกอบ ได้แก่ คาร์บอน 52.59 เปอร์เซ็นต์ ออกซิเจน 7.45 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 0.49 เปอร์เซ็นต์ โฮโดรเจน 2.21 เปอร์เซ็นต์ และซัลเฟอร์ 0.02 เปอร์เซ็นต์ (ประภัสสร และคณะ, 2563)

1.1) ความเป็นรูพรุนของไบโอชาร์แกลบ แกลบเมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะมีรูพรุนสูงขึ้นและมีโครงสร้างคาร์บอนเสถียรเพิ่มสูงขึ้น (Purevsuren *et al*., 2003) จากรายงานของประภัสสร และคณะ (2563) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน พบว่า ไบโอชาร์แกลบที่พื้นที่ผิว 7.16 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุน 0.0052 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของไบโอชาร์แกลบ (ประภัสสร และคณะ, 2563)
(A) กำลังขยาย 350 เท่า (B) กำลังขยาย 2,000 เท่า

1.2) ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ไบโอชาร์แกลบมีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 9.27 - 9.60 (ประไพพิศ และคณะ, 2557) ความเป็นกรดเป็นด่างเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในทางการเกษตรเพื่อเป็นสารปรับปรุงบำรุงดิน กระบวนการผลิตไบโอชาร์จะทำให้ค่าความเป็นกรดด่างของไบโอชาร์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลตั้งต้นที่นำมาใช้ผลิตไบโอชาร์ เนื่องจากการให้ความร้อน หรือกระบวนการไพโรไลซิสจะทำให้หมู่ฟังก์ชันที่แสดงความเป็นกรดถูกกำจัดออก เช่น หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl) ไฮดรอกซิล (hydroxyl) หรือฟอร์มิล (formyl) เป็นต้น (Weber and Quicker, 2018)

1.3) ค่าความจุแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity, CEC) ไบโอชาร์แกลบมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก 178.71 เซนติโมลของประจุต่อกิโลกรัม (ประภัสสร และคณะ, 2563) ซึ่งจำนวนของประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ เช่น แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) โพแทสเซียมไอออน (K^{+}) โซเดียมไอออน (Na^{+}) และแอมโมเนียม (NH^{+}_{4}) ที่อยู่ในดิน หรือไบโอชาร์ ซึ่งค่าความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้นั้น สามารถใช้อธิบายเกี่ยวกับความอุดมสมบูรณ์ของดินได้ เนื่องจากธาตุอาหารจะต้องอยู่ในรูปของประจุเกือบทั้งหมดที่สามารถถูกดูดซึมโดยต้นพืชและจุลินทรีย์ ดังนั้นค่าความจุแลกเปลี่ยนประจุบวก จึงใช้สำหรับอธิบายลักษณะทางโครงสร้างของพื้นผิว และหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวดินของไบโอชาร์ได้ (Weber and Quicker, 2018)

2) การใช้ประโยชน์ไบโอชาร์แกลบเพื่อปรับปรุงดิน

ไบโอชาร์ภายใต้อุณหภูมิ และเวลากระบวนการไพโรไลซิสที่เหมาะสม พบว่า ไบโอชาร์แกลบมีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 9.27 ค่าการนำไฟฟ้า 270.00 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และมีค่าความจุแลกเปลี่ยนประจุบวก 178.71 เซนติโมลของประจุต่อกิโลกรัม ความสามารถการอุ้มน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 31.16 - 31.28 เปอร์เซ็นต์ และค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 70 – 74 โดยค่าทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของไบโอชาร์สำหรับการนำไปใช้ในภาคเกษตรกรรม สำหรับการนำไปทดลองด้านการปลูกพืชจากการนำไบโอชาร์แกลบไปทดสอบปลูกต้นคะน้า มีแนวโน้มการเจริญเติบโตดีกว่าการไม่ใช้ไบโอชาร์มีค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ การผลิตไบโอชาร์แกลบที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม จะส่งผลให้ไบโอชาร์แกลบมีคุณสมบัติที่ดี สามารถแก้ไขปัญหาคุณภาพของดิน (ประภัสสร และคณะ, 2563) และจากการศึกษาของ Liang *et al.* (2006) พบว่า ถ่านไบโอชาร์เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน และมีบทบาทต่อกระบวนการทางชีวเคมีในดิน การหมุนเวียนธาตุอาหาร ปริมาณของถ่านไบโอชาร์สูงจะมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนประจุบวกและประจุลบได้ดีที่ผิวของถ่านไบโอชาร์ จะมีผลต่อการดูดซับธาตุอาหารเข้าไปในอนุภาคของถ่านไบโอชาร์ ซึ่งการแลกเปลี่ยนอยู่ภายใต้อุณหภูมิ ความชื้น การมีปฏิสัมพันธ์ร่วมกันของพื้นที่ผิวถ่านไบโอชาร์ อนุภาคดินเหนียว และก้อนดิน ตัวอย่างเช่น การใช้ถ่านไบโอชาร์แกลบในการปรับปรุงบำรุงดินในประเทศลาว การปรับปรุงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ และเพิ่มผลผลิตให้กับข้าวไร่ทางตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศลาว ในระหว่างปี 2007 ช่วงฤดูฝน พบว่า การใช้ถ่านไบโอชาร์อัตรา 640 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับการใช้ปุ๋ยเคมี ช่วยเพิ่มสภาพนำน้ำของดินอิ่มตัวด้วยน้ำในช่วงบนของดิน และการหมุนเวียนใน xylem sap ของต้นข้าว ทำให้ผลผลิตข้าวสูงขึ้นในพื้นที่ที่มีฟอสฟอรัสต่ำ และช่วยในการตอบสนองต่อไนโตรเจน และปุ๋ยเคมีไนโตรเจน และฟอสฟอรัส (Hidetoshi *et al.,* 2009) ซึ่งให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Liang *et al.* (2006) ถ่านไบโอชาร์ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน และมีบทบาทต่อกระบวนการทางชีวเคมีในดิน การหมุนเวียนธาตุอาหาร โดยศึกษาในดินอับดับ Anthrosols จาก Brazilian Amazon สามารถเพิ่มความจุความชื้นสนามของดินด้วย (Joseph *et al.,* 2007) และจากรายงานของ Masulili *et al.,* (2010) การใช้ไบโอชาร์แกลบที่มีความชื้น 4.96 เปอร์เซ็นต์ ค่าพีเอช 8.7 และค่าความจุแคตไอออน 17.57 เซนติโมลของประจุต่อกิโลกรัม เมื่อนำใส่ในดิน 15

ตันต่อเฮกตาร์ หรือประมาณ 2.45 ตันต่อไร่ มีผลให้ค่าความหนาแน่นของดินลดลง มีค่าความพรุน ความชื้น ปริมาณคาร์บอน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และแคลเซียมเพิ่มขึ้น อีกทั้งคุณสมบัติรูพรุน พื้นที่ผิว และกักเก็บความชื้นสูง ส่งเสริมความเป็นประโยชน์ทางชีวภาพในดินและบริเวณรากพืช เช่น ไบโอชาร์จากแกลบสามารถเก็บเชื้อจุลินทรีย์ละลายฟอสฟอรัส ส่งผลต่อการดูดใช้ฟอสฟอรัสของพืช ส่งเสริมการเจริญมวลชีวภาพ และผลผลิตพืช อีกทั้งเก็บรักษาความมีชีวิตรอดของจุลินทรีย์ในสภาพแวดล้อมได้นานถึง 6 เดือน (Husna *et al.,* 2019)

3.2 ปุ๋ยชีวภาพและการใช้ประโยชน์ทางการเกษตร

3.2.1 ปุ๋ยชีวภาพ

ความหมายของปุ๋ยชีวภาพ จุลินทรีย์ในดินเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีบทบาทสำคัญในการเกิดกระบวนการต่าง ๆ ในดิน ทั้งในด้านการหมุนเวียนธาตุอาหาร ซึ่งจะทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ในดิน รวมทั้งแปรสภาพสารอนินทรีย์ให้เป็นธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์กับพืช นอกจากนี้ ยังใช้ในการเจริญเพิ่มจำนวนเซลล์ของจุลินทรีย์อีกด้วย สำหรับการนำจุลินทรีย์มาใช้ประโยชน์ในด้านการเพิ่มธาตุอาหารให้กับพืชทั้งที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ และการแปรสภาพธาตุอาหารโดยจุลินทรีย์ เรียกว่า ปุ๋ยชีวภาพ โดยความหมายของปุ๋ยชีวภาพ มีดังนี้

ปุ๋ยชีวภาพ ตามพระราชบัญญัติปุ๋ย (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550 หมายถึง ปุ๋ยที่ได้จากการนำจุลินทรีย์ที่มีชีวิตที่สามารถสร้างธาตุอาหาร หรือช่วยให้ธาตุอาหารเป็นประโยชน์กับพืช มาใช้ในการปรับปรุงบำรุงดินทางชีวภาพ ทางกายภาพ หรือทางชีวเคมี การนำมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรนั้น ส่วนใหญ่จะเน้นเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน และการเจริญเติบโตของพืช

3.2.2 ผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2562ข)

1) คุณสมบัติของปุ๋ยชีวภาพ พด. 12

ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถสร้างธาตุอาหาร หรือช่วยให้ธาตุอาหารเป็นประโยชน์กับพืช เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน และสร้างฮอร์โมนส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ประกอบด้วยจุลินทรีย์ 4 ประเภท ได้แก่

แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ (nitrogen fixation bacteria, NFB) เป็นจุลินทรีย์ที่อยู่อย่างอิสระในดิน สามารถตรึงก๊าซไนโตรเจนในอากาศ และเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแอมโมเนียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชโดยกิจกรรมเอนไซม์ไนโตรจีเนส ได้แก่ *Azotobacter tropicalis* โดยการตรึงไนโตรเจนทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ โดยไนโตรเจนอนินทรีย์ที่เป็นผลลัพธ์จากการตรึงนี้ คือ แอมโมเนีย และเมื่อได้รับโปรตอนจะเป็นไอออนแอมโมเนียม ($NH4^+$) เอนไซม์หลักที่ทำหน้าที่ คือ เอนไซม์ไนไทรจีเนส การตรึงไนโตรเจนทางชีวภาพเป็นการรีดักชันก๊าซไดไนโตรเจนไปสู่รูปแอมโมเนีย แต่เนื่องจากก๊าซไดไนโตรเจนมีความเสถียรมากปฏิกิริยารีดักชันนี้ จึงต้องใช้พลังงานค่อนข้างสูง (16 ATP) โดยมีไดอะแกรมของปฏิกิริยาดังนี้

$$N2 + 8H + 8e^- + 16ATP \longrightarrow 2NH_3 + H_2 + 16ADP + 16Pi$$

เมื่อพิจารณาเฉพาะการเกิด $2NH_3$ จะใช้ 6 โปรตอน และ 6 อิเล็กตรอนเท่านั้น ที่ให้แก่ก๊าซไดไนโตรเจน แต่ในปฏิกิริยาจะมีการรีดักชัน หรือให้อิเล็กตรอน 2 ตัว แก่โปรตอน 2 ตัว เพื่อเกิด H_2 ด้วยเสมอรวมทั้งหมดแล้วปฏิกิริยารีดักชันก๊าซไดไนโตรเจน จำนวน 1 โมเลกุล ใช้อิเล็กตรอน 8 ตัว และพลังงาน 16 ATP (ใช้ 2 ATP ต่ออิเล็กตรอน 1 ตัว) (ธงชัย, 2557)

แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส (phosphate solubilizing bacteria, PSB) และเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส เป็นจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตกรดอินทรีย์ปลดปล่อยออกมาละลายสารประกอบอนินทรีย์ฟอสเฟตที่อยู่ในรูปไม่ละลาย เช่น หินฟอสเฟต ให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดใช้ได้ จุลินทรีย์จะช่วยละลายฟอสเฟต จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะสร้างกรดอินทรีย์ หรือเอนไซม์ฟอสฟาเตส ออกมาละลายฟอสเฟตในดินที่ละลายยาก และฟอสเฟตจากหินฟอสเฟต ให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ การเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสในดินทำได้โดยการใส่หินฟอสเฟตร่วมกับการใช้จุลินทรีย์ละลายฟอสเฟต ได้แก่ *Burkholderia unamae*

แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม (potassium solubilizing bacteria, KSB) มีกลไกการละลายโพแทสเซียมโดยจุลินทรีย์ โดยโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปแร่ธรรมชาติมี 3 รูป คือ 1) รูปที่ตรึงไว้ด้วยอนุภาคของคอลลอยด์ 2) รูปที่แลกเปลี่ยนได้ และ 3) รูปที่ละลายน้ำได้ โพแทสเซียมในธรรมชาติสามารถเป็นประโยชน์กับพืชได้ 3 วิธี คือ การสลายตัวทางกายภาพ การสลายตัวทางเคมี และการสลายตัวทางชีวภาพ ในทางชีวภาพจุลินทรียสามารถสร้างกรดอินทรีย์ออกมาละลายโพแทสเซียมออกจากแร่ดินเหนียวบางชนิดได้ บทบาทสำคัญของจุลินทรีย์ดินต่อความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดิน ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการ mobilization โดยการปลดปล่อยกรดอินทรีย์ เช่น กรดแลคติค กรดซิตริค และกรดออกซาลิค เป็นต้น หรือกรดอนินทรีย์ เช่น กรดคาร์บอนิค กรดไนตริค และกรดซัลฟูริค เป็นต้น ที่ปลดปล่อยกรดอินทรีย์ช่วยละลายแร่ธาตุที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบในกลุ่มไมก้า เช่น ไบโอไทต์ มัสโคไวต์ และกลุ่มของเฟลด์สปาร์ เช่น ไมโครไคลน์ ออโทเคลส ให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ได้แก่ *Bacillus subtilis*

แบคทีเรียสร้างสารกระตุ้นการเจริญเติบโต หรือฮอร์โมนพืช (Plant growth promoting rhizobacteria, PGPR) ฮอร์โมนที่แบคทีเรียสร้าง ได้แก่ ออกซิน จิบเบอเรลลิน และไซโตไคนิน ช่วยกระตุ้นการเจริญของรากขนอ่อน และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวราก ทำให้ความสามารถในการดูดน้ำและธาตุอาหารเพิ่มมากขึ้น ได้แก่ *Azotobacter chroococcum*

2) ประสิทธิภาพในการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12

ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถสร้างธาตุอาหาร หรือช่วยให้ธาตุอาหารเป็นประโยชน์กับพืช เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน และสร้างฮอร์โมนส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ประกอบด้วยจุลินทรีย์ 4 ประเภท (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551) จุลินทรีย์ที่ให้ธาตุอาหารไนโตรเจนเป็นจุลินทรีย์ที่อยู่อย่างอิสระในดินสามารถตรึงก๊าซไนโตรเจนในอากาศ และเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแอมโมเนียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชโดยกิจกรรมเอนไซม์ไนโตรจีเนส ได้แก่ แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ *Azotobacter tropicalis* เป็นจุลินทรีย์ที่อยู่อย่างอิสระในดินสามารถตรึงก๊าซไนโตรเจนในอากาศ และเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแอมโมเนียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชโดยกิจกรรมเอนไซม์ไนโตรจีเนส มีค่าการตรึงไนโตรเจน 1,246 นาโนโมลเอทิลีนต่อต้นต่อชั่วโมง ในการทดสอบกับข้าวโพด (พิกุล และ ดารารัตน์, 2552) แบคทีเรียละลายสารประกอบฟอสเฟต *Burkholderia unamae* มีประสิทธิภาพละลายในดินที่มีสภาพเป็นกรด กลาง และด่างเล็กน้อย ให้อยู่ในรูปฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มขึ้น 14.27 เปอร์เซ็นต์ 13.76 เปอร์เซ็นต์ และ 48.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ฉวีวรรณ, 2552) แบคทีเรียละลายสารประกอบโพแทสเซียม *Bacillus subtilis* เป็นจุลินทรีย์ที่ปลดปล่อยกรดอินทรีย์ช่วยละลายแร่ธาตุที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ สามารถละลายโพแทสเซียม

เฟลด์สปาร์ให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มขึ้น 9.02 เปอร์เซ็นต์ (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) และแบคทีเรียสร้างสารเสริมการเจริญเติบโตของพืช *Azotobacter chroococcum* สามารถสร้างฮอร์โมนออกซิน 56.18 มิลลิกรัมต่อลิตร (Leaungvutiviroj *et al*., 2010) มีผลกระตุ้นการงอกของเมล็ดข้าวและคะน้าจาก 76.67 เปอร์เซ็นต์ และ 60 เปอร์เซ็นต์ เป็น 93.33 เปอร์เซ็นต์ ช่วยกระตุ้นการเจริญของรากขนอ่อน และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวราก ทำให้มีความสามารถในการดูดน้ำและธาตุอาหารเพิ่มมากขึ้น จุลินทรีย์ดังกล่าวสามารถเจริญที่อุณหภูมิระหว่าง 30 - 35 องศาเซลเซียส และเจริญในสภาพที่มีความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 6 – 8 (พิมพ์ธิดา และคณะ, 2552)

3) วิธีการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร (กรมพัฒนาที่ดิน, 2562ข)

3.1) วัสดุสำหรับขยายเชื้อ

ปุ๋ยหมัก	300	กิโลกรัม
รำละเอียด	3	กิโลกรัม
ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 จำนวน 1 ซอง	100	กรัม

3.2) วิธีการขยายเชื้อ

3.2.1) ผสมปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 และรำข้าวในน้ำ 1 ปี๊บ (20 ลิตร) คนให้เข้ากันนาน 5 นาที

3.2.2) รดสารละลายปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ลงบนกองปุ๋ยหมักและคลุกเคล้าให้เข้ากัน ปรับความชื้นให้ได้ 70 เปอร์เซ็นต์ โดยตรวจสอบความชื้นด้วยการกำปุ๋ยหมักเป็นก้อน และไม่มีน้ำไหลออกมา เมื่อคลายมือออกปุ๋ยหมักยังคงสภาพเป็นก้อนอยู่ได้

3.2.3) ตั้งกองปุ๋ยหมักเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้มีความสูง 50 เซนติเมตร และใช้วัสดุคลุมกองปุ๋ยเพื่อรักษาความชื้น

3.2.4) กองปุ๋ยหมักไว้ในที่ร่มเป็นระยะเวลา 4 วัน แล้วจึงนำไปใช้

3.3) ผลจากการขยายเชื้อด้วยวิธีการขยายเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 บนกองปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัม และคลุกเคล้าให้เข้ากัน ปรับความชื้นให้ได้ 70 เปอร์เซ็นต์ บ่มเป็นระยะเวลา 4 วัน สามารถเพิ่มปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระแบคทีเรียละลายสารประกอบฟอสเฟต แบคทีเรียละลายสารประกอบโพแทสเซียม และแบคทีเรียสร้างสารเสริมการเจริญเติบโตของพืช ได้ปริมาณเชื้อสูงสุด 1.4×10^{8} 3.9×10^{13} 6.1×10^{12} และ 1.07×10^{14} เซลล์ต่อกรัม ตามลำดับ (ฉวีวรรณ, 2552)

4) การใช้ประโยชน์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 สำหรับการผลิตพืช

ข้าว จากรายงานของปณิชา และ วิลาวัลย์ (2553) พบว่า การใช้ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 สามารถลดการใช้ปุ๋ยเคมีลง 25 – 50 เปอร์เซ็นต์ ให้ผลผลิตข้าวหอมมะลิ และข้าว กข. เฉลี่ย 572 และ 746 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้น 3 และ 6 เปอร์เซ็นต์

ยางพารา จากรายงานของอุชุกร และ วรภา (2552) พบว่า การใช้ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้ออัตรา 5 กิโลกรัมต่อต้น มีแนวโน้มทำให้เปอร์เซ็นต์ของเนื้อยางพาราเพิ่มขึ้น 56.8 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มความหนาของเปลือกยางพาราสูงสุด 5.8 มิลลิเมตร และทำให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำสุด และการใช้ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ร่วมกับหินฟอสเฟตในอัตรา 124 กิโลกรัมต่อไร่ และโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ในอัตรา 127 กิโลกรัมต่อไร่ ช่วยเพิ่มระดับปริมาณอินทรียวัตถุ และฟอสฟอรัสในดินได้สูงสุดเท่ากับ 0.76 เปอร์เซ็นต์ และ 11.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และช่วยให้สูญเสียโพแทสเซียมในดินต่ำสุด

กะหล่ำปลี จากรายงานของประพิน และ กฤษณะ (2552) การใช้ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับการใช้หินฟอสเฟตอัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ และแร่เฟลสปาร์อัตรา 68 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้ผลผลิตกะหล่ำปลีสูงสุด 9,248 กิโลกรัมต่อไร่

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จากรายงานของอำพร และ ไชยยา (2552) การใช้ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 สามารถลดการใช้ปุ๋ยเคมีลง 25 - 50 เปอร์เซ็นต์ มีผลผลิต อยู่ในช่วง 1352.70 - 1,356.50 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งผลผลิตที่ได้จะต่ำกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีอัตราเต็มเล็กน้อยที่ให้ผลผลิต 1,489.30 กิโลกรัมต่อไร่

หญ้ารูซี่ จากรายงานของฉวีวรรณ (2552) การใช้ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยคอกอัตรา 500 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้มีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งหญ้ารูซี่สูงเท่ากับ 10,117 และ 2,598 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ

3.3 การประยุกต์ใช้วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเกษตรเป็นแหล่งอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์

3.3.1 กากน้ำตาล (molasses)

1) กากน้ำตาล หรือโมลาส เป็นน้ำตาลที่ได้จากน้ำอ้อยที่เหลือจากกระบวนการทำให้เกิดการตกผลึกเป็นน้ำตาลทรายแล้ว โดยกากน้ำตาลจะมีส่วนผสมของน้ำตาลอยู่ แต่มีระดับต่ำเกินกว่าที่จะสกัดเป็นน้ำตาลได้อีก โดยในการผลิตที่ใช้อ้อย 1 ตัน จะได้กากน้ำตาลประมาณ 45 - 60 กิโลกรัม กากน้ำตาลเป็นผลพลอยได้จากการผลิตน้ำตาล สามารถจำแนกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ blackstrap molasses คือ กากน้ำตาลที่ได้จากการผลิตน้ำตาลทรายขาว มีปริมาณน้ำตาลอยู่ประมาณ 50 - 60 เปอร์เซ็นต์ หรือมีปริมาณของแข็งเมื่อเจือจางด้วยน้ำในอัตราส่วน 1 : 1 อยู่ประมาณ 42 องศาบริกซ์ refinery molasses คือ กากน้ำตาลที่ได้จากการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ มีปริมาณน้ำตาลประมาณ 48 เปอร์เซ็นต์ และ high test molasses คือ กากน้ำตาลที่ได้จากการนำน้ำอ้อยมาย่อยด้วยกรด แล้วระเหยให้เข้มข้นเป็นน้ำเชื่อม อาจเรียกว่า invert molasses มีปริมาณน้ำตาลประมาณ 77 เปอร์เซ็นต์ (Paturaul, 1989)

2) องค์ประกอบทางเคมีของกากน้ำตาล

กากน้ำตาลลักษณะเหนียวข้นสีน้ำตาลเข้ม มีองค์ประกอบทางเคมี ดังนี้ มีสมบัติเป็นกรด พีเอช 5.09 - 5.25 มีค่าการนำไฟฟ้าค่อนข้างสูงระหว่าง 7.5 - 13.79 เดซิซีเมนต่อเมตร แสดงว่า มีความเข้มข้นของเกลือสูง ธาตุไนโตรเจนมีประมาณ 0.8 เปอร์เซ็นต์ ฟอสฟอรัสที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ 0.13 - 0.19 เปอร์เซ็นต์ และโพแทสเซียม 2.5 - 4.1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนธาตุอาหารรองมีแคลเซียมและแมกนีเซียม 1.1 - 1.4 และ 0.4 - 0.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อีกทั้งมีคาร์โบไฮเดรต 1,355.56 มิลลิกรัมต่อลิตร ไขมัน 46.78 กรัมต่อลิตร ไฮโดรเจน 5.83 เปอร์เซ็นต์ ออกซิเจน 37.55 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอน 55.15 เปอร์เซ็นต์ และน้ำตาลรีดิวซ์ 267.92 กรัมต่อลิตร (เสาวรส, 2560)

3) การใช้ประโยชน์กากน้ำตาลสำหรับเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์

กากน้ำตาลมีองค์ประกอบแหล่งอาหารสำคัญที่มีประโยชน์ต่อจุลินทรีย์ คือ สารอินทรีย์คาร์บอน เนื่องจากเป็นแหล่งอาหารสำคัญของจุลินทรีย์ หรือเป็นตัวเริ่มต้น หรือสตาร์ทเตอร์สูงถึง 35 เปอร์เซ็นต์ ประโยชน์ของกากน้ำตาลนอกจากเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ระยะเริ่มต้นแล้ว กากน้ำตาลยังทำหน้าที่ดูดน้ำเลี้ยงออกจากเซลล์พืช หรือเซลล์สัตว์ทำให้เซลล์เหี่ยวและแตก จึงง่ายต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ส่งผลให้กระบวนการหมักของปุ๋ยน้ำเกิดได้รวดเร็วขึ้น (พูนสุข, 2558) และจากรายงานของจันจิรา และคณะ (2559) ศึกษาวิธีการขยายปริมาณหัวเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว พบว่า เชื้อจุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน สามารถขยายปริมาณเชื้อในน้ำที่มีส่วนผสมของกากน้ำตาลความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และเติมออกซิเจนในถังขยายนาน 48 ชั่วโมง สามารถเพิ่มปริมาณเชื้อแบคทีเรียตรึงไนโตรเจน 6.62 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียสร้างฮอร์โมน 6.74 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส 8.19

log เซลล์ต่อมิลลิลิตร และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม 8.53 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร และกรมพัฒนาที่ดิน ส่งเสริมให้มีการใช้ประโยชน์จากกากน้ำตาลความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ในการขยายเชื้อจุลินทรีย์จากสารเร่งซุปเปอร์ พด. 6 เพื่อเป็นแหล่งอาหารและพลังงานสำหรับการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2562ข) และจากรายงานของอภิเชษฐ และคณะ (ม.ป.ป.) การศึกษาสูตรอาหารในการผลิตแบคทีเรียกรดแลกติก *Lactobacillus acidophilus* TISTR 1338 โดยใช้แหล่งคาร์บอนเป็นกากน้ำตาล และแหล่งไนโตรเจนจากกากเซลล์ยีสต์ทดแทนการเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ De Man Rogosa and Sharpe (MRS) พบว่า แหล่งคาร์บอน และแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรีย คือ ปริมาณกากน้ำตาลที่มีความเข้มข้น 11 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณกากเซลล์ยีสต์ที่มีความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้ปริมาณเซลล์สูงสุดเท่ากับ 2.14×10^{9} CFU ต่อมิลลิลิตร ที่เวลา 22 ชั่วโมง และปริมาณความเข้มข้นของกากน้ำตาล 2 เปอร์เซ็นต์ เป็นแหล่งอาหารเป็นแหล่งคาร์บอนต่อการเจริญเติบโตของ *Azotobacter vinelandii* สูงที่เวลาเลี้ยงเชื้อ 24 ชั่วโมง ภายหลังจากนั้นปริมาณเชื้อลดลง (ภารุจีร์, 2556)

3.3.2 น้ำกากส่า (distillery slop)

1) น้ำกากส่า หมายถึง น้ำกากส่าที่เกิดจากกระบวนการน้ำทิ้งที่ออกจากหอกลั่นประเภท mash column ในการกลั่นสุราโดยวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักสุรา ได้แก่ กากน้ำตาล (sugar cane molasses) มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในปริมาณความเข้มข้นสูง นอกจากนี้ ยังมีสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งเกิดจากสารคาราเมล (caramel) ในน้ำกากส่าสารคาราเมลนี้เกิดจากปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชั่น (polymerization) ในกระบวนการผลิตน้ำตาล ดังนั้นสารคาราเมลจึงมีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่ไม่ทราบโครงสร้างที่แน่นอน โดยทั่วไปเรียกสารประกอบพวกนี้ว่า เมลานอยดิน และสีน้ำตาล สารเมลานอยดินจะอยู่ในสภาพคอลลอยด์ และมีประจุลบ (Kato and Tsuchida, 1981)

2) แหล่งที่มาของน้ำกากส่า เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการในการผลิตสุรา จะต้องใช้วัตถุดิบในการผลิต คือ กากน้ำตาลและข้าวเหนียว โดยนำมาหมักในถังหมักในอัตราความเข้มข้นที่เหมาะสม พร้อมกับใส่เชื้อยีสต์ หรือเชื้อหมัก เมื่อหมักได้นาน 48 ชั่วโมง เชื้อยีสต์จะเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นเอทิลแอลกอฮอล์ 51.10 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 48.90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำตาล แต่ในทางปฏิบัติประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ของน้ำตาลเหล่านี้เท่านั้นที่จะเปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์ นอกนั้นจะถูกยีสต์นำไปใช้ในการเจริญเติบโต และเปลี่ยนเป็นผลพลอยได้อื่น การแยกเอาแอลกอฮอล์ออกจากของเหลวรวม ทำได้โดยใช้วิธีกลั่น เพราะจุดเดือดของแอลกอฮอล์อยู่ที่อุณหภูมิ 78.5 องศาเซลเซียส แต่ของเหลวอื่น ๆ หรือน้ำจะมีอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้ไอน้ำแยกเอาแอลกอฮอล์ออกในขั้นตอนการกลั่นจะมีน้ำกากส่าทิ้งประมาณ 9.5 ลูกบาศก์เมตรของแอลกอฮอล์ 95 ดีกรี มีน้ำตาลไหม้ น้ำกากส่าอีกส่วนหนึ่งได้จากการล้างถังหมัก (ฐปน และคณะ, 2552)

3) องค์ประกอบทางเคมีของน้ำกากส่า

น้ำกากส่า แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ น้ำกากส่าสด มีค่าพีเอชในช่วง 4.5 - 5.0 มีสารอาหารวิตามินรวม เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ น้ำกากส่าที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศมาแล้วเหมาะกับการใช้กับพืชโดยเฉพาะปาล์ม เพราะมีสารอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมที่พืชต้องการ หากนำไปตากแห้งจะมีปริมาณไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส : โพแทสเซียม ร้อยละ 4 : 1 : 6 โดยองค์ประกอบทางเคมีของน้ำกากส่าของโรงงานสุรา ค่าบีโอดี 27,475 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดี 118,098 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็ง 75,829 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไนโตรเจน 935 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณฟอสฟอรัส 115.2 มิลลิกรัม

ต่อลิตร ปริมาณโพแทสเซียม 4,763 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณซัลเฟต 3,763 มิลลิกรัมต่อลิตร กลูโคส 10.30 กรัมต่อลิตร และพีเอช 3.6 (ไพจิตรา, 2552) น้ำกากส่ามีข้อดี คือ เป็นสารอินทรีย์ไม่มีโลหะหนักปนเปื้อน มีคุณค่าด้านโปรตีนจากยีสต์ มีความหวานจากน้ำตาล และมีธาตุอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อยู่ค่อนข้างสูง อีกทั้งยังมีธาตุอาหารโดยเฉพาะธาตุโพแทสเซียมอยู่ในปริมาณมาก (ประวิทย์ และคณะ, 2550)

4) การใช้ประโยชน์น้ำกากส่าเป็นแหล่งอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์

น้ำกากส่ามีองค์ประกอบของธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญของจุลินทรีย์ สามารถใช้เป็นแหล่งอาหารเลี้ยง จากรายงานของ Omar *et al*. (2002) ศึกษาความเข้มข้นของน้ำกากส่าต่อการเจริญเติบโตเชื้อตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ เพื่อผลิตเป็น biovinasse Inoculant เพื่อเป็นวัสดุปรับปรุงดินในการเพิ่มผลผลิตถั่ว faba ภายใต้การจัดการน้ำระบบชลประทาน โดยการใส่เชื้อจุลินทรีย์ที่ตรึงไนโตรเจนอิสระ *Azospirillum brasilense Bacillus polymyxa* และ *Azotobacter chroococcum* ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำกากส่า 6 8 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในการขยายปริมาณหัวเชื้อ ทดสอบโดยการคลุกเมล็ดและใส่ลงดิน 0.5 1.0 และ 1.5 ตัน ในพื้นที่ 2.62 ไร่ มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของผลผลิตถั่ว faba สูงกว่าตำรับควบคุม 33 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบการคลุกเมล็ด และการใส่ลงดินร่วมกับการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนที่ 2 ระดับ คือ อัตราครึ่งหนึ่ง และอัตราเต็มจากอัตราแนะนำ พบว่า การใส่จุลินทรีย์ทุกระดับความเข้มข้นร่วมกับการใส่ปุ๋ยเคมีอัตราครึ่งหนึ่งของอัตราแนะนำ ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของผลผลิตถั่ว faba 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม การศึกษาการใส่น้ำกากส่าในการผลิตผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ ใส่เป็นส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อ *Pseudomonas tolaasii* เป็นเชื้อสร้างสารส่งเสริมการเจริญเติบโต ส่งเสริมการละลายของฟอสเฟต ผลิตฮอร์โมน และสร้างสาร antibiotic พบว่า การใส่น้ำกากส่าสำหรับเลี้ยงเชื้อจากธรรมชาติ โดยการใส่น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์ สาร $MgSO_4$ 0.1 กรัมต่อลิตร และสาร KH_2PO_4 1 กรัมต่อลิตร มีผลให้ลดการใส่ปริมาณสารเคมีลง 25 เปอร์เซ็นต์ และการใส่น้ำกากส่าสำหรับเลี้ยงเชื้อจากธรรมชาติที่ราคาถูกเป็นการประยุกต์ใส่ในการผลิตผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพเพื่อลดต้นทุนการผลิต (Emilce *et al*., 2009) และการศึกษาการใช้ประโยชน์น้ำกากส่าเพื่อผลิตปุ๋ยชีวภาพตรึงไนโตรเจนละลายฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และสร้างฮอร์โมนพืช พบว่า การใช้อัตราส่วนของน้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผสมกับ $MgSO_4$ 0.1 กรัมต่อลิตร และ KH_2PO_4 1 กรัมต่อลิตร ผสมให้เข้ากัน ใส่หัวเชื้อจุลินทรีย์จากปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน อัตรา 1 เปอร์เซ็นต์ แล้วเติมออกซิเจนด้วยเครื่องปั๊มออกซิเจน เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจน 3.10×10^6 CFU ต่อมิลลิลิตร ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส 7.08×10^8 CFU ต่อมิลลิลิตร ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม 7.94×10^8 CFU ต่อมิลลิลิตร และปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช 2.51×10^6 CFU ต่อมิลลิลิตร ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์คงที่ได้นาน 21 วัน และจากการทดสอบประสิทธิภาพในแปลงทดลอง พบว่า การใส่ปุ๋ยชีวภาพชนิดเหลวจากน้ำกากส่าทุก 4 เดือน ร่วมกับการใส่ปุ๋ยเคมี 50 เปอร์เซ็นต์ อย่างต่อเนื่อง 2 ปี มีผลต่อการสะสมปริมาณโพแทสเซียมในดิน และตรวจพบการสะสมปริมาณไนโตรเจนในใบอ้อยสูงสุดที่อายุ 6 เดือน เพิ่มผลผลิตอ้อยสด 18.4 ตันต่อไร่ เพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์ ให้ผลผลิตน้ำตาล 3.09 ตันต่อไร่ เพิ่มขึ้น 31.49 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม ขณะที่การใส่ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดิน 100 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลผลิตอ้อยสด 18.8 ตันต่อไร่ ให้ผลผลิตน้ำตาล 3.21 ตันต่อไร่ (จันจิรา และ นวลจันทร์, 2562)

5) การใช้ประโยชน์น้ำกากส่าทางการเกษตร

การใช้ประโยชน์น้ำกากส่าสำหรับการผลิตพืช มีการนำมาใช้ประโยชน์โดยตรงสำหรับการปลูกอ้อย เช่น จากการใส่น้ำกากส่าอัตรา 50 ลูกบาศก์เมตรต่อเฮกตาร์ ร่วมกับปุ๋ยเคมี 55 เปอร์เซ็นต์ (N) 72

เปอร์เซ็นต์ (P_2O_5) และ 100 เปอร์เซ็นต์ (K_2O) ส่งผลให้ผลผลิตอ้อยสูงขึ้นมากกว่าการไม่ใส่น้ำกากส่า (Gomezy, 2000) และการใส่น้ำกากส่าอัตรา 25 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยหมักและปุ๋ยเคมี มีผลให้เส้นผ่าศูนย์กลาง ความสูงของอ้อย และปริมาณธาตุอาหารพืชในดินเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการไม่ใส่น้ำกากส่า (ประวิทย์ และคณะ, 2550) และการใส่น้ำกากส่า 30 60 และ 90 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ ให้ผลผลิตเฉลี่ย 32.5 31.3 30.0 ตันต่อไร่ ตามลำดับ อีกทั้งการใส่น้ำกากส่าที่อัตราสูง 60 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของดิน โดยช่วยเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณโพแทสเซียม แมกนีเซียม แมงกานีส เหล็ก และกำมะถันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และการใส่น้ำกากส่าในอัตราต่ำกว่า 90 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ ไม่ทำให้จำนวนแบคทีเรียในดินแตกต่างทางสถิติจากการไม่ใส่น้ำกากส่าแต่อย่างใด (ทัศนีย์, 2551) และได้มีการนำน้ำกากส่ามาใส่เป็นแหล่งธาตุอาหารพืชในการปลูกพืชหลายชนิด เช่น ข้าว และมันสำปะหลัง เป็นต้น มีการใช้ประโยชน์น้ำกากส่ามีลักษณะเป็นความเป็นกรดด่างสูง ค่าซีโอดี และค่าบีโอดีสูง ซึ่งมีสารอินทรียวัตถุประกอบด้วยยีสต์ แอมโมเนีย และฟอสเฟต ไปใช้ในการเกษตรได้โดยตรงจากการปล่อยน้ำกากส่าเข้านาข้าว ซึ่งจะใช้ใส่ในฤดูแล้ง หรือขณะที่นาข้าวอยู่หลังการเก็บเกี่ยว เป็นต้น (ไพจิตรา, 2552) และใส่น้ำกากส่าเพื่อเพิ่มคุณค่าสารอาหาร โดยเฉพาะไนโตรเจนและโพแทสเซียมเหมาะที่จะใช้กับพืชล้มลุก หรือไม้ยืนต้น เช่น ข้าว ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง ปาล์มน้ำมัน และพืชผัก (ทัศนีย์ และ สมบูรณ์, 2547) จากการศึกษาการใช้ประโยชน์น้ำกากส่าในเชิงเกษตรกรรม พบว่า น้ำกากส่ามีความสำคัญในการใช้เป็นสารปรับปรุงดินในพื้นที่เพาะปลูกของเกษตรกร นอกจากนั้น ยังเกิดประโยชน์ทางสิ่งแวดล้อมเป็นการลดการใช้ปุ๋ยเคมีในการเพาะปลูก (รัชฎา และ วิสาขา, 2563)

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิจารณ์

4.1 การศึกษาอัตราส่วนผสมของน้ำกากส่าต่อกากน้ำตาล สำหรับเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อต่อการเพิ่มปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับการผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

จากการศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกากส่าและกากน้ำตาล ต่อการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียสำหรับการผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว โดยเปรียบเทียบส่วนผสมน้ำกากส่า 8 สูตร ได้แก่ น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และน้ำกากส่า 10 20 30 40 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ตลอด 24 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างในแต่ละทุก 24 ชั่วโมง จนครบ 96 ชั่วโมง นำมานับปริมาณเชื้อแบคทีเรียทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช และการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่าง มีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรียในอาหารเลี้ยงเชื้อ

ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ จากการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ 0 ชั่วโมง มีปริมาณเชื้อ 4.922 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร (ตารางที่ 3) และตรวจนับปริมาณเชื้อทุก 24 ชั่วโมง จนครบ 96 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แต่ละสูตรมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 5 เมื่อแบ่งช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ คือ ในช่วงแรก 24 ชั่วโมง ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดจากสูตร 3 4 6 และ 7 น้ำกากส่า 10 20 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 6.661 – 7.079 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร รองลงมา คือ สูตร 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และสูตร 5 น้ำกากส่า 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อ 6.479 และ 6.477 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร แต่ทุกสูตรให้ค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ และสูตร 8 น้ำกากส่า 100 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อต่ำสุด 4.804 และ 4.676 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ หลังจากนั้น ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระค่อนข้างคงที่ในช่วงที่สอง คือ 48 ชั่วโมง พบว่า สูตร 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และสูตร 3 4 5 และ 6 น้ำกากส่า 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีปริมาณสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 6.413 – 6.762 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร และในช่วง 72 ชั่วโมง ปริมาณเชื้อจะลดลงต่ำกว่า 6.00 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 96 ชั่วโมง มีปริมาณเชื้อต่ำกว่า 4.00 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร

ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส จากการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ 0 ชั่วโมง มีปริมาณเชื้อ 6.541 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร (ตารางที่ 3) และทุก 24 ชั่วโมง จนครบ 96 ชั่วโมง มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 6 พบว่า แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส เมื่อแบ่งช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ คือ ในช่วงแรก 24 ชั่วโมง สูตร 3 น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อสูงสุด 7.973 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับสูตร 4 และ 5 น้ำกากส่า 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ หรือสูตร 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 7.119 - 7.409 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร แต่มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่น ๆ และ

ในช่วง 48 ถึง 72 ชั่วโมง ปริมาณเชื้อจะเพิ่มขึ้นจนค่อนข้างคงที่ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 8.184 - 9.723 และ 8.846 - 9.311 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ โดยที่ 48 ชั่วโมง สูตร 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และสูตร 5 น้ำกากส่า 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อสูงสุด 9.723 และ 9.445 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ และที่ 72 ชั่วโมง สูตร 3 4 5 6 และ 7 น้ำกากส่า 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หรือสูตร 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 8.852 – 9.311 โดยที่ช่วงเวลา 96 ชั่วโมง ยังคงมีปริมาณเชื้อสูงในสูตร 3 4 และ 5 น้ำกากส่า 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 9.226 - 9.483 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร และทุกสูตรมีค่าสูงกว่าสูตร 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ และสูตร 8 น้ำกากส่า 100 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อต่ำสุด

ตารางที่ 5 ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ

สูตร	ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ (log เซลล์ต่อมิลลิลิตร)			
	24 ชม.	48 ชม.	72 ชม.	96 ชม.
สูตร 1 น้ำกากส่า 5 %	4.804 c	3.985 b	3.497 cd	2.377 bc
สูตร 2 กากน้ำตาล 5 %	6.479 b	6.540 a	5.374 a	3.377 a
สูตร 3 น้ำกากส่า 10 % + กากน้ำตาล 5 %	6.779 ab	6.413 a	4.694 ab	3.475 a
สูตร 4 น้ำกากส่า 20 % + กากน้ำตาล 5 %	7.041 a	6.668 a	4.296 bc	2.979 ab
สูตร 5 น้ำกากส่า 30 % + กากน้ำตาล 5 %	6.477 b	6.762 a	4.288 bc	2.989 ab
สูตร 6 น้ำกากส่า 40 % + กากน้ำตาล 5 %	7.079 a	6.467 a	3.887 bcd	1.888 c
สูตร 7 น้ำกากส่า 50 % + กากน้ำตาล 5 %	6.661 ab	4.173 b	3.037 d	2.062 c
สูตร 8 น้ำกากส่า 100% + กากน้ำตาล 5 %	4.676 c	3.092 c	1.173 e	1.173 d
F-test	**	**	**	**
%CV	4.31	7.07	15.14	15.43

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT
** แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 6 ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัสตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ

สูตร	ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส (log เซลล์ต่อมิลลิลิตร)			
	24 ชม.	48 ชม.	72 ชม.	96 ชม.
สูตร 1 น้ำกากส่า 5 %	5.831 c	6.305 e	6.789 b	6.134 c
สูตร 2 กากน้ำตาล 5 %	7.119 ab	9.723 a	8.852 a	8.318 b
สูตร 3 น้ำกากส่า 10 % + กากน้ำตาล 5 %	7.973 a	7.775 cd	8.846 a	9.483 a
สูตร 4 น้ำกากส่า 20 % + กากน้ำตาล 5 %	7.409 ab	8.517 abcd	9.213 a	9.279 ab
สูตร 5 น้ำกากส่า 30 % + กากน้ำตาล 5 %	7.201 ab	9.445 ab	9.298 a	9.226 ab
สูตร 6 น้ำกากส่า 40 % + กากน้ำตาล 5 %	6.572 bc	8.184 bcd	9.311 a	7.060 c
สูตร 7 น้ำกากส่า 50 % + กากน้ำตาล 5 %	5.818 c	8.781 abc	9.136 a	6.801 c
สูตร 8 น้ำกากส่า 100% + กากน้ำตาล 5 %	4.599 d	7.204 de	7.294 b	6.134 c
F-test	**	**	**	**
%CV	9.35	9.37	5.81	7.41

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT
** แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม จากการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ 0 ชั่วโมง มีปริมาณเชื้อ 6.639 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร (ตารางที่ 3) และทุก 24 ชั่วโมง จนครบ 96 ชั่วโมง ดังตารางที่ 7 พบว่า แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม ในช่วงแรก 24 ชั่วโมง ปริมาณเชื้อจะเพิ่มขึ้นสูงสุด คือ สูตร 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อ 8.513 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับสูตร 3 น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อ 8.273 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญอย่างสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่น ๆ และในช่วง 48 ถึง 76 ชั่วโมง ปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้นสูงจนค่อนข้างคงที่ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยที่ 48 ชั่วโมง สูตร 2 3 4 5 6 7 และ 8 มีค่าสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 8.094 – 9.433 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร และที่ 76 ชั่วโมง ปริมาณเชื้อเริ่มลดลงในสูตร 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ สูตร 3 และ 4 น้ำกากส่า 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อสูงสุดระหว่าง 8.107 – 8.426 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร และในช่วง 96 ชั่วโมง ปริมาณเชื้อลดลงระหว่าง 6.456 – 7.756 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร และทุกสูตรมีปริมาณเชื้อสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณเชื้อต่ำสุด เชื้อไม่เจริญมีปริมาณเชื้อค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ 24 – 96 ชั่วโมง มีค่าระหว่าง 6.479 – 6.964 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร

ตารางที่ 7 ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ

สูตร	ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม (log เซลล์ต่อมิลลิลิตร)			
	24 ชม.	48 ชม.	72 ชม.	96 ชม.
สูตร 1 น้ำกากส่า 5 %	6.479 d	6.964 c	6.506 d	5.438 c
สูตร 2 กากน้ำตาล 5 %	8.513 a	8.639 ab	8.107 ab	6.962 b
สูตร 3 น้ำกากส่า 10 % + กากน้ำตาล 5 %	8.273 ab	8.094 b	8.179 ab	7.184 ab
สูตร 4 น้ำกากส่า 20 % + กากน้ำตาล 5 %	7.394 bcd	8.507 ab	8.426 a	7.756 a
สูตร 5 น้ำกากส่า 30 % + กากน้ำตาล 5 %	7.206 cd	8.345 ab	7.289 bcd	6.554 b
สูตร 6 น้ำกากส่า 40 % + กากน้ำตาล 5 %	7.165 cd	9.0830ab	7.311 bcd	7.180 ab
สูตร 7 น้ำกากส่า 50 % + กากน้ำตาล 5 %	7.607 abc	9.433 a	7.539 abc	6.699 b
สูตร 8 น้ำกากส่า 100% + กากน้ำตาล 5 %	7.381 bcd	8.529 ab	7.058 cd	6.456 b
F-test	*	**	**	**
%CV	7.95	7.45	7.11	6.75

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT
* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์
** แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมน จากการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ 0 ชั่วโมง มีปริมาณเชื้อ 4.864 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร (ตารางที่ 3) และทุก 24 ชั่วโมง จนครบ 96 ชั่วโมง ดังตารางที่ 8 พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) แบคทีเรียสร้างฮอร์โมน ในช่วงแรก 24 ชั่วโมง ปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้น สูตร 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ สูตร 3 4 5 และ 6 น้ำกากส่า 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 6.196 – 6.668 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในช่วงที่สอง คือ 48 ชั่วโมง ค่อนข้างคงที่ในสูตร 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ สูตร 3 4 และ 5 น้ำกากส่า 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อสูงสุดระหว่าง 6.596 – 6.929 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร และในช่วง 72 ชั่วโมง ปริมาณเชื้อจะลดลงต่ำกว่า 6.000 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 96 ชั่วโมง มีปริมาณเชื้อต่ำ 4.000 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร และทุกสูตรมีค่าสูงกว่าสูตร 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ เชื้อเจริญได้ไม่ดี มีปริมาณเชื้อลดลงตั้งแต่ 24 – 96 ชั่วโมง

ตารางที่ 8 ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืชตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ

สูตร	ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช (log เซลล์ต่อมิลลิลิตร)			
	24 ชม.	48 ชม.	72 ชม.	96 ชม.
สูตร 1 น้ำกากส่า 5 %	5.459 bc	4.612 b	3.674 c	2.399 bc
สูตร 2 กากน้ำตาล 5 %	6.196 ab	6.888 a	5.397 a	3.340 a
สูตร 3 น้ำกากส่า 10 % + กากน้ำตาล 5 %	6.450 a	6.596 a	4.828 ab	3.764 a
สูตร 4 น้ำกากส่า 20 % + กากน้ำตาล 5 %	6.475 a	6.598 a	4.709 ab	3.585 a
สูตร 5 น้ำกากส่า 30 % + กากน้ำตาล 5 %	6.668 a	6.929 a	4.043 bc	2.551 b
สูตร 6 น้ำกากส่า 40 % + กากน้ำตาล 5 %	6.778 a	4.944 b	2.396 d	1.969 cd
สูตร 7 น้ำกากส่า 50 % + กากน้ำตาล 5 %	5.337 c	3.699 c	1.641 d	1.359 e
สูตร 8 น้ำกากส่า 100% + กากน้ำตาล 5 %	6.158 ab	3.193 c	1.709 d	1.576 de
F-test	**	**	**	**
%CV	6.97	8.29	15.40	13.02

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT
** แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

4.1.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว จากการเก็บตัวอย่างอาหารเลี้ยงเชื้อเหลวแต่ละสูตรทุก 24 ชั่วโมง จนครบ 96 ชั่วโมง (ตารางที่ 9) พบว่า ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว ทุกช่วงเวลามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อแบ่งช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อดังนี้ ในช่วงแรก 24 ชั่วโมง สูตร 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุด 5.39 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงกว่าสูตร 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และสูตร 3 น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 5.17 และ 5.11 ตามลำดับ และมีค่าสูงกว่าสูตรอื่น ๆ มีค่าพีเอชระหว่าง 4.36 - 4.47 และในช่วง 48 – 96 ชั่วโมง มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างลดลงค่อนข้างคงที่ โดยที่ 48 ชั่วโมง สูตร 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุด 5.37 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงกว่าสูตร 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 4.85 และมีค่าสูงกว่าสูตร 3 น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่า 4.53 และมีค่าสูงกว่าสูตร 4 5 6 7 และ 8 ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 4.20 – 4.33 โดยที่ 72 ชั่วโมง สูตร 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุด 5.34 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงกว่าสูตร 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ สูตร 3 และสูตร 5 น้ำกากส่า 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 4.69 – 4.88 แต่มีค่าสูงกว่าสูตรอื่น ๆ มีค่าพีเอชระหว่าง 3.92 – 4.71 และที่ 92 ชั่วโมง สูตร 1 น้ำกากส่า 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุด 5.33 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงกว่าสูตร 2 กากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ และสูตร 3 น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 4.88 และ 4.86 ตามลำดับ และมีค่าสูงกว่าสูตรอื่น ๆ มีค่าพีเอชระหว่าง 3.97 – 4.72 สอดคล้องกับรายงานของ Chinsamran and Suttisuwan (2015) แบคทีเรียสามารถเจริญในกากน้ำตาลที่มี

ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้เท่ากับ 12 องศาบริกซ์ ค่าพีเอชเท่ากับ 5.0 และใช้หัวเชื้อเริ่มต้นร้อยละ 10 โดยใช้ระยะเวลาหมัก 12 วัน และจากรายงานของ Bajpai and Sundara (1971) การเจริญของเชื้อแบคทีเรียความเป็นกรดเป็นด่างที่เหมาะสม คือ ระดับที่เป็นกลาง อยู่ในช่วง 6.5 - 7 หรือกรดเล็กน้อย อยู่ในช่วง 5.5 - 6.5 อีกทั้งสอดคล้องกับ Seesawhea *et al*. (2017) กระบวนการหมักที่มีองค์ประกอบของน้ำตาล แบคทีเรียสามารถใช้กับน้ำตาลในการเจริญเติบโตและการผลิตกรดอินทรีย์ ส่งผลต่อค่าพีเอชของอาหารลดลง และจากรายงานของเสาวรส (2560) การใช้น้ำกากส่าที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 50 – 100 และกากน้ำตาลร้อยละ 1 - 5 เพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารในระบบการเลี้ยงเชื้อเพื่อผลิตมีเทน พบว่า ค่าพีเอชลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของกากน้ำตาลและน้ำกากส่า เมื่อความเข้มข้นของสารอินทรีย์มากเกินไปเกิดการย่อยสลายของแบคทีเรียอย่างรวดเร็วจนเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยได้ ทำให้ค่าเป็นกรดเป็นด่างของระบบลดลง

ตารางที่ 9 ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อตามช่วงเวลาการเลี้ยงเชื้อ

สูตร	ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง			
	24 ชม.	48 ชม.	72 ชม.	96 ชม.
สูตร 1 น้ำกากส่า 5 %	5.39 a	5.37 a	5.34 a	5.33 a
สูตร 2 กากน้ำตาล 5 %	5.17 b	4.85 b	4.88 b	4.88 b
สูตร 3 น้ำกากส่า 10 % + กากน้ำตาล 5 %	5.11 b	4.53 c	4.69 bc	4.86 b
สูตร 4 น้ำกากส่า 20 % + กากน้ำตาล 5 %	4.36 c	4.20 d	3.92 e	3.97 f
สูตร 5 น้ำกากส่า 30 % + กากน้ำตาล 5 %	4.47 c	4.26 d	4.71 bc	4.72 c
สูตร 6 น้ำกากส่า 40 % + กากน้ำตาล 5 %	4.44 c	4.33 d	4.25 de	4.29 d
สูตร 7 น้ำกากส่า 50 % + กากน้ำตาล 5 %	4.43 c	4.27 d	4.42 cd	4.42 d
สูตร 8 น้ำกากส่า 100% + กากน้ำตาล 5 %	4.38 c	4.32 d	4.15 de	4.11 e
F-test	**	**	**	**
%CV	1.43	1.45	2.94	0.98

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT
** แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

จากการศึกษาอัตราส่วนผสมของอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสมสำหรับการผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ต่อการเพิ่มปริมาณของแบคทีเรีย จากการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้อุตสาหกรรมเกษตร ได้แก่ น้ำกากส่า และกากน้ำตาล เป็นแหล่งสารอาหารสำหรับเลี้ยงเชื้อ พบว่า ระดับความเข้มข้นของน้ำกากส่าที่ระดับความเข้มข้น 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ สามารถส่งเสริมการขยายปริมาณแบคทีเรียได้ แต่การใช้น้ำกากส่าที่ระดับความเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืชเจริญได้ไม่ดี แต่แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม สามารถเจริญได้ทุกระดับความเข้มข้นของน้ำกากส่า และเห็นได้ว่าในแบคทีเรียทั้ง 4 ชนิด โดยสูตร 3 คือ การใส่น้ำกากส่าความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ เป็นสูตรอาหารที่เพิ่มปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ได้ทั้ง 4 ชนิด ได้เร็วที่ช่วงเวลา 24 ชั่วโมง จนถึง 48 ชั่วโมง ประกอบด้วยปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ 6.779 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร

แบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช 6.450 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส 7.973 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม 8.273 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร จึงเป็นสูตรอาหารที่เหมาะสมกับการผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 แบบเหลว อาจมีปริมาณเชื้อน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน การตรวจสอบปริมาณจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ พบแบคทีเรียตรึงไนโตรเจน *Azotobacter tropicalis* แบคทีเรียละลายสารประกอบฟอสเฟต *Burkholderia unamae* แบคทีเรียละลายแร่โพแทสเซียม *Bacillus subtilis* และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนออกซิน *Azotobacter chroococcum* มีปริมาณเซลล์ 7.792 8.982 8.897 และ 7.944 log เซลล์ต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของปุ๋ยชีวภาพตามพระราชบัญญัติปุ๋ย (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550 ที่กำหนดไว้ว่า มีปริมาณจุลินทรีย์รับรองไม่น้อยกว่า 10^7 เซลล์ต่อกรัม หรือ 7.00 log เซลล์ต่อกรัม จากค่าเฉลี่ยแบคทีเรียทั้ง 4 ชนิด ในปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 แบบเหลว มีเพียงแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนออกซินมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียตรึงไนโตรเจน *Azotobacter tropicalis* และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนออกซิน *Azotobacter chroococcum* สามารถเจริญได้ดีที่ค่าพีเอช 6 - 7 ในสภาพควบคุมในถังหมัก ที่เวลาเลี้ยงเชื้อ 14 ชั่วโมง มีปริมาณเชื้อสูงถึง 15.150 - 16.120 log เซลล์ต่อมิลลิลิตร หรือ 1.4×10^{15} ถึง 1.5×10^{16} เซลล์ต่อมิลลิลิตร (ฉวีวรรณ และคณะ, 2554) แต่ *Azotobacter* ก็สามารถเจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีพีเอชระหว่าง 4.5 -.5.5 ถึง 9.0 เช่น *Azotobacter chroococcum* เจริญได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีสภาพเป็นกรด พีเอช 5.5 แต่สภาวะที่เหมาะสม คือ 7.2 - 8.2 (Saribay, 2003)

เมื่อพิจารณาการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือใช้อุตสาหกรรมเกษตรจากน้ำกากส่าและกากน้ำตาล เป็นแหล่งสารอาหารที่จุลินทรีย์สามารถเจริญได้ในแหล่งอาหารที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความต้องการสารอาหารของจุลินทรีย์แต่ละชนิด อาหารของจุลินทรีย์มีองค์ประกอบทั่วไป ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก ซึ่งจุลินทรีย์จะใช้ในการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน และกรดนิวคลิอิก เป็นต้น นอกจากนี้ ยังใช้ธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริม เช่น แมงกานีส สังกะสี โคบอลต์ เป็นโคแฟกเตอร์ รวมทั้งสารอินทรีย์เป็นปัจจัยที่สำคัญที่จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญอีกด้วย และสามารถคงความมีชีวิตของจุลินทรีย์ได้นานมากขึ้น (Jadhav *et al.,* 2018) สอดคล้องกับรายงานของไพจิตรา (2552) พบว่า น้ำกากส่าสด มีค่าพีเอชในช่วง 4.5 - 5.0 มีสารอาหารวิตามินรวม เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เพราะมีสารอาหาร ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม มีปริมาณร้อยละ 4 : 1 : 6 ปริมาณซัลเฟต 3,763 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการประยุกต์ใช้น้ำกากส่าเป็นแหล่งอาหาร สำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ เช่น จากรายงานของ Nakajima-Kambe *et al.* (1999) เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus smithii* สามารถเจริญและกำจัดสีในน้ำกากส่า และการเจริญของเชื้อรา เช่น *Penicillum decumbens Penicillum lignorum* และ *Aspergillus niger* เพื่อใช้ในระบบการบำบัดสีของน้ำกากส่า (Jimenez *et al*., 2003) และสอดคล้องกับรายงานของ Emilce *et al*. (2009) ศึกษาการผลิตผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพจากการใช้น้ำกากส่าและเนยแข็งเป็นส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อ *Pseudomonas tolaasii* เป็นเชื้อสร้างสารส่งเสริมการเจริญเติบโต ส่งเสริมการละลายของฟอสเฟต ผลิตฮอร์โมนต์พืช และสร้างสาร antibiotic พบว่า การใส่น้ำกากส่าสำหรับเลี้ยงเชื้อจากธรรมชาติ โดยการใส่ 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำกากส่า มีผลให้ลดการใส่ปริมาณสารเคมีลง 25 เปอร์เซ็นต์ และการใส่น้ำกากส่าสำหรับเลี้ยงเชื้อจากธรรมชาติที่ราคาถูก เป็นการประยุกต์ใส่ในการผลิตผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ เพื่อลดต้นทุนการผลิต สอดคล้องกับรายงานวิจัยของจันจิรา และ นวลจันทร์ (2562) ศึกษาการใช้ประโยชน์น้ำกากส่า เป็นแหล่งอาหารเลี้ยงเชื้อ ผลิตปุ๋ยชีวภาพตรึงไนโตรเจนอิสระ ละลายฟอสฟอรัส ละลายโพแทสเซียม และสร้างฮอร์โมนพืช พบว่า การใช้อัตราส่วนของน้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำ ผสมกับ $MgSO_4$ 0.1 กรัมต่อลิตร และ KH_2PO_4 1 กรัมต่อลิตร ผสมให้เข้ากัน ใส่หัวเชื้อจุลินทรีย์จากปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน อัตรา 1

เปอร์เซ็นต์ แล้วเติมออกซิเจนด้วยเครื่องปั๊มออกซิเจน เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจน เท่ากับ 3.10×10^6 CFU ต่อมิลลิลิตร (6.491 log เซลล์ต่อกรัม) ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส เท่ากับ 7.08×10^8 CFU ต่อมิลลิลิตร (8.850 log เซลล์ต่อกรัม) ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม เท่ากับ 7.94×10^8 CFU ต่อมิลลิลิตร (8.899 log เซลล์ต่อกรัม) และปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช เท่ากับ 2.51×10^6 CFU ต่อมิลลิลิตร (6.399 log เซลล์ต่อกรัม) ปริมาณแบคทีเรียคงที่ได้นาน 21 วัน อีกทั้งจากรายงานของ Omar *et al*. (2002) ศึกษาความเข้มข้นของน้ำกากส่าต่อการเจริญเติบโตเชื้อตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ ผลิตเป็นหัวเชื้อ biovinasse Inoculant ใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินในการเพิ่มผลผลิตถั่ว faba ภายใต้การจัดการน้ำระบบชลประทาน โดยใส่เชื้อจุลินทรีย์ที่ตรึงไนโตรเจนอิสระสายพันธุ์ *Azospirillum brasilense* *Bacillus polymyxa* และ *Azotobacter chroococcum* ที่ขยายปริมาณหัวเชื้อระดับความเข้มข้นของน้ำกากส่า 6 8 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สามารถเพิ่มปริมาณเชื้อจุลินทรีย์และผลผลิตพืชได้ อีกทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพน้ำกากส่าด้วยกากน้ำตาล เพื่อเป็นการเสริมแหล่งอาหารและพลังงานสำหรับการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งกากน้ำตาลเป็นวัสดุเหลือใช้ที่มีต้นทุนต่ำ (O-Thong *et al*., 2012) โดยจากรายงานของ Chinsamran and Suttisuwan (2015) แบคทีเรียสามารถเจริญในกากน้ำตาลที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้เท่ากับ 12 องศาบริกซ์ ค่าพีเอชเท่ากับ 5.0 และใช้หัวเชื้อเริ่มต้นร้อยละ 10 โดยใช้ระยะเวลาหมัก 12 วัน จากรายงานของอภิเชษฐ และคณะ (ม.ป.ป.) การศึกษาสูตรอาหารในการผลิตแบคทีเรียกรดแลกติก *Lactobacillus acidophilus* TISTR 1338 โดยใช้แหล่งคาร์บอนจากกากน้ำตาล และแหล่งไนโตรเจนที่จากกากเซลล์ยีสต์ ทดแทนการเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ De Man Rogosa and Sharpe (MRS) พบว่า แหล่งคาร์บอน และแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรีย คือ ปริมาณกากน้ำตาลที่มีความเข้มข้น 11 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณกากเซลล์ยีสต์ที่มีความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้ปริมาณเซลล์สูงสุดเท่ากับ 2.14×10^9 CFU ต่อมิลลิลิตร ที่เวลา 22 ชั่วโมง สอดคล้องกับรายงานของเสาวรส (2560) การใช้น้ำกากส่าที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 50 – 100 และใส่กากน้ำตาลร้อยละ 1 - 5 เพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารในระบบการเลี้ยงเชื้อ

ดังนั้นจากผลการทดลองนี้จึงได้เลือกสูตรอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว คือ น้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์ ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์ ปรับปริมาตรด้วยน้ำครบ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หลังจากนั้น ใส่หัวเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน โดยใช้หัวเชื้อ 0.10 เปอร์เซ็นต์ แล้วเติมออกซิเจนด้วยเครื่องปั๊มออกซิเจนปลาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงสามารถนำใช้ประโยชน์ต่อไป

4.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนของไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว

จากการศึกษา 2 ปัจจัย ดังนี้ ปัจจัยที่ 1 อัตราส่วนของไบโอชาร์แกลบต่อปริมาตรของปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จำนวน 3 อัตราส่วน ได้แก่ อัตราส่วนที่ 1 คือ ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 2 อัตราส่วนที่ 2 คือ ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 3 และอัตราส่วนที่ 3 ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 4 และปัจจัยที่ 2 ช่วงเวลาการดูดซับ 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ช่วงเวลา 3 ชั่วโมง และช่วงเวลา 6 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างในแต่ละตำรับการทดลอง นำมานับปริมาณเชื้อแบคทีเรียทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช มีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรียทั้ง 4 ชนิด ดังนี้

ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ จากการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระในไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ทั้ง 3 อัตราส่วน ได้แก่ ไบโอชาร์แกลบ :

ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 2 อัตราส่วน 1 : 3 และอัตราส่วน 1 : 4 พบว่า ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อ 5.270 5.270 และ 5.370 log เซลล์ต่อกรัม ตามลำดับ และระยะเวลาการดูดซับทั้ง 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลา 1 3 และ 6 ชั่วโมง พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนเฉลี่ย 5.130 5.350 และ 5.440 log เซลล์ต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 10)

ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช จากการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืชในไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ทั้ง 3 อัตราส่วน ได้แก่ ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 2 อัตราส่วน 1 : 3 และอัตราส่วน 1 : 4 พบว่า ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืชมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อ 5.720 5.720 และ 5.690 log เซลล์ต่อกรัม ตามลำดับ และระยะเวลาการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลวของไบโอชาร์แกลบ ทั้ง 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลา 1 3 และ 6 ชั่วโมง พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืชเฉลี่ย 5.710 5.830 และ 5.530 log เซลล์ต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 10)

ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส จากการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัสในไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ทั้ง 3 อัตราส่วน ได้แก่ ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 2 อัตราส่วน 1 : 3 และอัตราส่วน 1 : 4 พบว่า ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัสมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อ 7.190 7.240 และ 7.320 log เซลล์ต่อกรัม ตามลำดับ และระยะเวลาการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลวของไบโอชาร์แกลบ ทั้ง 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลา 1 3 และ 6 ชั่วโมง พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัสเฉลี่ย 7.220 7.300 และ 7.240 log เซลล์ต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 11)

ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม จากการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมในไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ทั้ง 3 อัตราส่วน ได้แก่ ได้แก่ ไบโอชาร์แกลบ : ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตราส่วน 1 : 2 อัตราส่วน 1 : 3 และอัตราส่วน 1 : 4 พบว่า ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อ 5.560 5.500 และ 5.620 log เซลล์ต่อกรัม ตามลำดับ และระยะเวลาการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลวของไบโอชาร์แกลบ ทั้ง 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลา 1 3 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมมีค่าแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ที่ช่วงเวลาการดูดซับ 1 ชั่วโมง มีปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมเฉลี่ยสูงสุด 5.790 log เซลล์ต่อกรัม มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลา 3 ชั่วโมง มีปริมาณเชื้อ 5.380 log เซลล์ต่อกรัม และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับช่วงเวลา 6 ชั่วโมง มีปริมาณเชื้อ 5.510 log เซลล์ต่อกรัม (ตารางที่ 11)

จากผลการศึกษาอัตราส่วนของไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับเซลล์จุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสม คือ การใช้ไบโอชาร์แกลบ 1 ส่วน ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด.12 ชนิดเหลว 2 ส่วน (อัตราส่วน 1 : 2) ใช้ระยะเวลาดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีผลให้ปริมาณแบคทีเรียของปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช มีปริมาณเชื้อ 5.310 5.770 7.200 และ 6.040 log เซลล์ต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองเห็นได้ว่า การใช้ไบโอชาร์แกลบต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ที่อัตราส่วน 1 : 3 หรือ 1 : 4 โดยแช่ไบโอชาร์แกลบเพื่อดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด.12 ชนิดเหลว เป็นระยะเวลา 3 หรือ 6 ชั่วโมง การใช้อัตราสูงและระยะเวลาเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของแบคทีเรียในไบโอชาร์แกลบ ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ไบโอชาร์แกลบ 1 ส่วน ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิด

เหลว 2 ส่วน (อัตราส่วน 1 : 2) โดยใช้เวลาการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เป็นวิธีการที่เหมาะสม ไบโอชาร์แกลบสามารถดูดซับของเหลวภายในรูพรุนโดยใช้ระยะเวลาน้อยที่สุด จากลักษณะโครงสร้างความเป็นรูพรุนของไบโอชาร์แกลบมีพื้นที่ผิว 7.16 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุน 0.0052 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม (ประภัสสร และคณะ, 2563) ไบโอชาร์มีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดมีความพรุนสูง และเป็นของแข็งที่มีความคงตัว เนื่องจากลักษณะความพรุนของไบโอชาร์จะช่วยกักเก็บน้ำ และธาตุอาหารในดิน (อรสา, 2552) อีกทั้งคุณสมบัติความสามารถในการอุ้มน้ำ เป็นผลมาจากความพรุนในไบโอชาร์ จึงทำให้น้ำสามารถเข้าไปอยู่ในรูพรุนบนไบโอชาร์เหล่านั้นได้ (Chun *et al.*, 2004; Pimchuai *et al*., 2010) จึงเลือกวิธีการดังกล่าวนำไปใช้ประโยชน์ในแปลงทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพต่อไป

ตารางที่ 10 ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระและแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืชในไบโอชาร์แกลบ

อัตราส่วนไบโอชาร์ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว		ระยะเวลาการแช่ (ชั่วโมง)							
		ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจน (log เซลล์ต่อกรัม)				ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช (log เซลล์ต่อกรัม)			
		1 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	ค่าเฉลี่ย	1 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	ค่าเฉลี่ย
1 : 2		5.310	5.130	5.370	5.270	5.770	5.600	5.700	5.720
1 : 3		4.750	5.600	5.450	5.270	5.860	5.760	5.780	5.720
1 : 4		5.330	5.310	5.480	5.370	5.850	5.220	5.590	5.690
ค่าเฉลี่ย		5.130	5.350	5.440	-	5.710	5.830	5.530	-
F-test	Hr (a)		ns				ns		
	Ratio(b)		ns				ns		
	(a)*(b)		ns				ns		
CV (%)			5.34				6.35		

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT
ns = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 11 ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัสและแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมในไบโอชาร์แกลบ

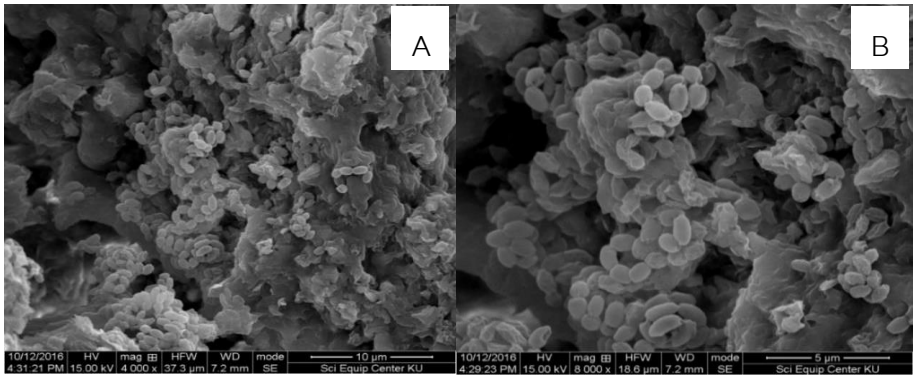
อัตราส่วนไบโอชาร์ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว	ระยะเวลาการแช่ (ชั่วโมง)							
	ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส (log เซลล์ต่อกรัม)				ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม (log เซลล์ต่อกรัม)			
	1 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	ค่าเฉลี่ย	1 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	ค่าเฉลี่ย
1 : 2	7.200	7.290	7.090	7.190	6.040	5.380	5.270	5.560
1 : 3	7.150	7.230	7.340	7.240	5.440	5.460	5.590	5.500
1 : 4	7.310	7.370	7.290	7.320	5.880	5.310	5.680	5.620
ค่าเฉลี่ย	7.220	7.300	7.240	-	5.790 a	5.380 b	5.510 ab	-
F-test Hr (a)		ns				*		
F-test Ratio (b)		ns				ns		
F-test (a)*(b)		ns				ns		
CV (%)		5.10				6.59		

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT
ns = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ
* = แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ๙๕ เปอร์เซ็นต์

4.2.2 การตรวจสอบการเข้าอาศัยของเซลล์แบคทีเรียภายในรูพรุนของไบโอชาร์แกลบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำตัวอย่างจากการทดลองที่ 2 ไบโอชาร์แกลบ 1 ส่วน ต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว 2 ส่วน (อัตราส่วน 1 : 2) แช่นาน 1 ชั่วโมง นำมาตรวจสอบการเข้าอาศัยของเซลล์จุลินทรีย์ภายในรูพรุนของไบโอชาร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของไบโอชาร์แกลบสูง สามารถตรวจพบเซลล์จุลินทรีย์ภายในรูพรุนเป็นจำนวน แสดงดังภาพที่ 5 ลักษณะภาพ 3 มิติ ที่กำลังขยาย 4,000 เท่า และที่กำลังขยาย 8,000 เท่า เนื่องจากวัสดุแกลบเมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นในการผลิตไบโอชาร์จะทำให้ไบโอชาร์แกลบมีโครงสร้างคาร์บอนเสถียรเพิ่มสูงขึ้นและมีรูพรุนสูงขึ้น (Purevsuren *et al.,* 2003) อีกทั้งจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน พบว่า ไบโอชาร์แกลบมีพื้นที่ผิว 7.16 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.0052 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม (ประภัสสร และคณะ, 2563) ทำให้เซลล์ของแบคทีเรียสามารถเข้าอาศัยที่พื้นที่ผิวและช่องว่างของไบโอชาร์แกลบได้ สอดคล้องกับรายงานการวิจัย พบว่า ไบโอชาร์มีศักยภาพในการเป็นวัสดุรองรับจุลินทรีย์ได้เท่าเทียมกับเวอร์มิคูไลท์ (Vermiculite) ลิกไนต์ (lignite) พีทมอส (peat moss) และปุ๋ยหมัก (Bashan, 1998) และกลไกการตรึงจุลินทรีย์ด้วยไบโอชาร์จากกระบวนการตรึงจุลินทรีย์โดยการเกาะบนพื้นผิวและรูพรุนผ่านการดูดซับ ปฏิกิริยาระหว่างไฟฟ้าสถิต การสร้างกรดไอออน และการจับโควาเลนต์ (Liu *et al*., 2020; Vasilieva *et al.,* 2021; Zhang *et al*., 2014)

โดยการดูดซับพื้นผิวและการช่องว่างของรูพรุนขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของแรงที่ไม่จำเพาะ เช่น การยึดเกาะระหว่างพื้นผิวของถ่านไบโอชาร์ และจุลินทรีย์ (Wu *et al.,* 2022) จุลินทรีย์มีแนวโน้มที่จะเกาะติดกับวัสดุพาหะโดยการผลิตสารยึดเกาะ ที่เรียกว่า โพลีเมอร์นอกเซลล์ ซึ่งช่วยให้จุลินทรีย์เติบโตและแพร่กระจายได้ทั่วทั้งพื้นผิวและรูพรุนด้านในของวัสดุพาหะ (Li *et al*., 2022) และสอดคล้องกับรายงานของ Chen *et al*. (2021) ใช้ไบโอชาร์เป็นตัวพาในการตรึง *Bacillus cereus* จากการวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า มีพื้นผิวที่หยาบ และมีรูพรุนของถ่านไบโอชาร์เป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์ ลดการสูญเสียจุลินทรีย์ อีกทั้งช่วยรักษากิจกรรมของจุลินทรีย์ และใช้ประโยชน์จากไบโอชาร์ในการเก็บรักษาและเพิ่มประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในดิน โดยการใช้ไบโอชาร์ในตรึงเซลล์แบคทีเรียที่ละลายฟอสฟอรัส *Pseudomonas* sp. (Glodowska *et al*., 2016)



ภาพที่ 5 ลักษณะของเซลล์แบคทีเรียในรูพรุนไบโอชาร์แกลบ (A) ขยาย 4,000 เท่า (B) ขยาย 8,000 เท่า

4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเจริญเติบโต และผลผลิตของคะน้าในแปลงทดลอง ดังนี้

จากการศึกษาประสิทธิภาพของไบโอชาร์แกลบที่ดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ต่อการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน การเจริญเติบโต และผลผลิตคะน้าในแปลงจากการปลูกทั้ง 2 ครั้ง มีรายละเอียดดังนี้

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของดิน

1) สมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง

จากการเก็บตัวอย่างดินก่อนการทดลองที่ระดับความลึก 0 – 15 เซนติเมตร โดยสุ่มจำนวน 15 จุด และนำมาคลุกเคล้าให้เข้ากันให้เป็น 1 ตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์สมบัติของดิน พบว่า ดินมีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง 8.27 ดินเป็นด่างปานกลาง ค่าการนำไฟฟ้าในดิน จากการวัดด้วยอัตราส่วน 1 : 5 ของสารละลายดินก่อนการทดลอง มีค่าการนำไฟฟ้า 0.15 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร จัดเป็นดินไม่เค็ม (ตารางที่ 12) มีปริมาณอินทรียวัตถุ 1.51 เปอร์เซ็นต์ จัดอยู่ในระดับต่ำ มีธาตุอาหารหลักในดิน ได้แก่ ปริมาณธาตุฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 271.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับสูงมาก ปริมาณธาตุโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 157.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับสูงมาก มีธาตุอาหารรองในดิน ได้แก่ ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 2,516 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับสูง และปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 355 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับปานกลาง (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2548) (ตารางที่ 13) ซึ่งการเจริญเติบโตของคะน้า จำเป็นต้องใช้ทั้งธาตุอาหารหลักและธาตุรอง การใช้ปุ๋ยเคมีในการเพิ่มธาตุอาหารของ

ต้นคะน้า ต้องการไนโตรเจน 20 กิโลกรัมต่อไร่ ฟอสฟอรัส 5 กิโลกรัมต่อไร่ และโพแทสเซียม 5 กิโลกรัมต่อไร่ (กรมวิชาการเกษตร, 2548)

2) สมบัติทางเคมีของดินหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1

ค่าการนำไฟฟ้าของดิน ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1 มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.14 - 0.16 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร (ตารางที่ 12) จะเห็นได้ว่าการใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด.12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ หรือการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ หรือร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ และร่วมกับการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้าของดินเมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.15 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร เมื่อนำเกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มีผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของดินอยู่ในระดับที่ไม่เค็ม (0 - 2 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร) หรือไม่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช

ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1 พบว่า โดยตำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ ผลให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 8.33 – 8.43 ดินเป็นด่างปานกลาง จากการใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ในอัตราที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ค่าค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินลดลง และมีค่าลดลงต่ำกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ตำรับการทดลองที่ 3 และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ หรือปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน เพิ่มสูงขึ้น มีค่าระหว่าง 8.47 - 8.50 มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการทดลอง มีค่าเท่ากับ 8.27 จัดได้ว่าดินเป็นด่างปานกลาง (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2548) (ตารางที่ 12)

ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1 (ตารางที่ 13) พบว่าตำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่า 1.85 2.02 และ 2.01 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จัดอยู่ในระดับปานกลาง มีค่าสูงกว่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่าระหว่าง 1.52 - 1.59 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า การใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลต่อการสะสมปริมาณอินทรียวัตถุในดินเพิ่มสูงขึ้นคิดเป็น 22.52 33.77 และ 33.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการทดลอง จัดว่าเป็นดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุอยู่ในระดับปานกลาง สามารถยกระดับอินทรียวัตถุของดินสูงขึ้น

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1 (ตารางที่ 13) พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติระหว่างตำรับการทดลอง การใส่ปุ๋ยเคมี

75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินอยู่ในช่วง 270.77 – 311.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ขณะที่ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมี อัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 แบบเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าระหว่าง 274.97 – 290.33 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า ดินมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จัดอยู่ในระดับสูงมาก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากดินก่อนการทดลอง 271.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และตำรับควบคุมมีค่า 262.57 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับสูงมากเช่นกัน

ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1 (ตารางที่ 13) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้สะสมในดินมีค่าสูงสุด 254.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าเท่ากับ 228.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ ตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 แบบเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 5 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่าระหว่าง 122.33 – 146.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินจัดอยู่ในระดับสูงมาก มีค่าสูงกว่าตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน เพิ่มขึ้นคิดเป็น 86.88 และ 107.92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1 (ตารางที่ 13) พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับควบคุม ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมี อัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าระหว่าง 2,315.3 – 2,901.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า ดินมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้จัดอยู่ในระดับสูงใกล้เคียงกับดินก่อนการทดลอง 2,516.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับสูงเช่นกัน

ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1 (ตารางที่ 13) พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับควบคุม ตำรับการทดลองที่ 2

การใส่ปุ๋ยเคมี อัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าระหว่าง 320.00 - 360.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า ดินมีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้จัดอยู่ในระดับปานกลาง ใกล้เคียงกับก่อนการทดลอง 355 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับปานกลาง

ตารางที่ 12 สมบัติทางเคมีของดินก่อนและหลังการทดลองของค่าการนำไฟฟ้า และความเป็นกรดเป็นด่างของดิน จากการปลูกครั้งที่ 1

ตำรับการทดลอง	EC (1:5) (dS/m)	pH (1:1)
ก่อนการทดลอง	0.15	8.27
1 = ไม่ใส่ปุ๋ย (control)	0.15	8.47 ab
2 = ปุ๋ยเคมี 100%	0.14	8.50 a
3 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่	0.14	8.50 a
4 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่	0.14	8.50 a
5 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่	0.14	8.43 abc
6 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่	0.16	8.37 bc
7 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่	0.14	8.33 c
F-test	ns	*
CV (%)	8.42	0.78

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT

ns = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

* = แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 13 สมบัติทางเคมีของดินก่อนและหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1

ตำรับการทดลอง	OM (%)	Avail. P (mg/kg)	Exch. K (mg/kg)	Exch. Ca (mg/kg)	Exch. Mg (mg/kg)
ก่อนการทดลอง	1.51	271.07	157.00	2,516.0	355.00
1	1.55 b	262.57	122.33 c	2,441.0	341.67
2	1.55 b	274.97	122.00 c	2,778.7	323.67
3	1.59 b	290.33	116.67 c	2,703.7	320.00
4	1.52 b	277.17	146.00 bc	2,470.7	360.67
5	1.85 a	270.77	129.33 c	2,901.0	326..67
6	2.02 a	311.03	228.00 ab	2,315.3	344.00
7	2.01 a	290.33	254.00 a	2,735.0	355.00
F-test	**	ns	*	ns	ns
CV (%)	8.05	9.54	33.46	13.84	8.21

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT

ns = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

* = แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

** = แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

3) สมบัติทางเคมีของดินหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 2

ค่าการนำไฟฟ้าของดิน ภายหลังการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 0.13 - 0.14 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร (ตารางที่ 14) จะเห็นได้ว่า การใส่ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของดิน เมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.15 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร เมื่อนำเกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของดินอยู่ในระดับที่ไม่เค็ม (0 - 2 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร) หรือไม่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช

ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน พบว่า ตำรับการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) ตำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ-ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ และตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 8.27 - 8.33 แต่มีค่าลดลงต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้น มีค่าระหว่าง 8.43 - 8.47 มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบ

กับก่อนการทดลอง มีค่าเท่ากับ 8.27 จัดได้ว่าดินเป็นด่างปานกลาง (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2548) (ตารางที่ 14)

เมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1 และ 2 พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลให้ความเป็นด่างของดินลดลงมากว่าการใส่ปุ๋ยเคมีกับปัจจัยอื่น ๆ และมีค่าใกล้เคียงกับดินก่อนการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงคุณสมบัติของไบโอชาร์แกลบที่มีสมบัติเป็นด่าง มีค่า 9.6 ด้วยการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ที่มีสมบัติค่าความเป็นกรดพีเอชต่ำกว่า 5 ทำให้พื้นที่พื้นที่ผิวและรูพรุนของไบโอชาร์แกลบบรรจุด้วยสารละลายของปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จึงลดสมบัติความเป็นด่างของไบโอชาร์แกลบก่อนใส่ลงดิน และเพิ่มสารละลายที่มีค่าความเป็นกรดลงในดินอีกด้วย อีกทั้งบริเวณพื้นผิวไบโอชาร์จะมีหมู่ฟีนอลิก หมู่ไฮดรอซิล และหมู่คาร์บอนิล ซึ่งจะทำหน้าที่จับไฮโดรเจนไอออน ที่ละลายอยู่ในสารละลาย (Brewer and Brown, 2012) ดังนั้นการใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ในอัตราที่สูงขึ้น จึงมีแนวโน้มรักษาระดับความเป็นด่างของดินไม่ให้สูงขึ้น จึงไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของพีเอชดิน และคุณสมบัติของไบโอชาร์ยังมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเป็นด่างของดินได้อีกด้วย (Brady and Weil, 2021)

ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 2 (ตารางที่ 15) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 1.67 - 1.83 เปอร์เซ็นต์ และสูงกว่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่าระหว่าง 1.40 - 1.53 เปอร์เซ็นต์ จัดอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการทดลอง มีค่าเท่ากับ 1.51 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า การใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลต่อการสะสมปริมาณอินทรียวัตถุในดินเพิ่มสูงขึ้น จัดว่าเป็นดินที่มีปริมาณอินทรียวัตถุอยู่ในระดับปานกลาง สามารถยกระดับอินทรียวัตถุของดินก่อนการทดลองจาก 1.51 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มเป็นอินทรียวัตถุเฉลี่ย 1.75 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้นคิดเป็น 15.89 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1 และ 2 พบว่า ตำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด.12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลให้ปริมาณอินทรียวัตถุของดินภายหลังการทดลองทั้ง 2 ครั้ง มีค่าการสะสมของปริมาณอินทรียวัตถุในดินเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับรายงานของการใส่ไบโอชาร์อัตรา 1,000 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลต่อปริมาณอินทรียวัตถุในดินเพิ่มขึ้นมากกว่าใส่ปุ๋ยหมักที่อัตราเดียวกัน (ดนัย และ วิวัฒน์, 2565) เช่นเดียวกับรายงานของเกศศิรินทร์และคณะ (2558) การใส่ไบโอชาร์ในอัตรา 1,000 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มการสะสมอินทรียวัตถุในดินสูงกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นจากรายงานของจิตนิภา (2558) พบว่า การใส่ไบโอชาร์ร่วมกับปุ๋ยเคมีในการปลูกข้าวไร่ มีผลทำให้ดินมีปริมาณอินทรียวัตถุเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการใช้ปุ๋ยเคมี

เพียงอย่างเดียว และสะสมธาตุอาหารในดินสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีแบบเดี่ยว ๆ สอดคล้องกับผลการศึกษาของสายชล และคณะ (2563) พบว่า ผลของไบโอชาร์ร่วมกับการจัดการปุ๋ยต่อผลผลิต และความเข้มข้นธาตุอาหารในถั่วฝักยาวไร้ค้าง มีผลให้ปริมาณอินทรียวัตถุสูงกว่าตำรับที่ไม่ใช้ไบโอชาร์ ทั้งนี้เนื่องจากไบโอชาร์แกลบมีองค์ประกอบของอินทรีย์คาร์บอนคงตัวสูง 32.30 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน และช่วยเพิ่มปริมาณชีวมวลในดินจากปริมาณเศษซากพืชในดิน และสอดคล้องกับการประเมินคุณภาพดินจากการใส่ไบโอชาร์เพื่อเพิ่มคาร์บอนในดิน โดยการใส่ไบโอชาร์ในอัตราส่วนที่มีค่าสูงขึ้นยิ่งมีผลต่อทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินเพิ่มสูงขึ้น (บรรเจิดลักษณ์ และ รติกร, 2560) เนื่องจากไบโอชาร์มีปริมาณเปอร์เซ็นต์อินทรียวัตถุสูง มีส่วนช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน และช่วยเพิ่มปริมาณชีวมวลในดินจากปริมาณเศษซากพืชนั้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองปลูกไม้ผลชนิดต่าง ๆ ในสภาพดินที่ค่อนข้างเป็นทรายจัด พบว่า การใช้ปุ๋ยหมักร่วมกับไบโอชาร์ ดินมีปริมาณอินทรียวัตถุเพิ่มสูงขึ้น (พินิจภณ, 2558) อีกทั้งไบโอชาร์เป็นอินทรีย์คาร์บอนเป็นรูปที่มีเสถียรภาพ แม้ว่าจะสลายตัวเล็กน้อยในช่วงแรก แต่ส่วนที่เหลือจะทนทานอย่างยิ่งในดิน (Major *et al.,* 2010)

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 2 (ตารางที่ 15) พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินอยู่ในช่วง 274.97 – 287.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมี อัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าระหว่าง 281.90 - 296.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า ดินมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์จัดอยู่ในระดับสูงมาก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากดินก่อนการทดลอง 271.07 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และตำรับควบคุมมีค่า 253.95 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับสูงมากเช่นกัน

เมื่อพิจารณาปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1 และ 2 พบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสในดินมีค่าอยู่ในระดับสูงมากไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากดินมีค่าความเป็นด่างพีเอชมากกว่า 8 ส่งผลต่อการสะสมแคลเซียมและแมกนีเซียมคาร์บอเนต ดินที่มีสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของดินสูงมักจะมี $CaCO_3$ หรือ $MgCO_3$ สะสมอยู่ ไอออนฟอสเฟตจะทำปฏิกิริยาได้ดี และรวดเร็วกับ Ca^{2+} และ Mg^{2+} เกิดเป็นสารแคลเซียม หรือแมกนีเซียมฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ยาก และพืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เกิดการตรึงฟอสเฟตไอออนในดิน เมื่อใส่ปุ๋ยฟอสเฟตที่ละลายได้ดีลงไปในดิน พืชจะดูดปุ๋ยใช้ได้เพียง 10 - 25 เปอร์เซ็นต์ของฟอสเฟตที่ละลายได้ในปุ๋ยเท่านั้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) อีกทั้งไบโอชาร์มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัส มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง จึงช่วยดูดซับธาตุอาหารได้ดี และช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน (ประไพพิศ และคณะ, 2557) สอดคล้องกับรายงานของ Zhang *et al*. (2014) ไบโอชาร์ที่มีผลต่อความเป็นประโยชน์และการดูดซับธาตุฟอสฟอรัสในดิน และช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสในดิน แต่ปริมาณการดูดซับนั้นขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุของไบโอชาร์

ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 2 (ตารางที่ 15) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้สะสมในดินมี

ค่าสูงสุด 150.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าเท่ากับ 130.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมี อัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ ตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 5 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ ที่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่าระหว่าง 62.42 – 81.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินจัดอยู่ในระดับสูงมาก ขณะที่การไม่ใส่ไบโอชาร์ดินมีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินจัดอยู่ในระดับปานกลาง และมีค่าสูงกว่าตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน เพิ่มขึ้นคิดเป็น 84.90 และ 113.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1 และ 2 พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการใส่ปัจจัยการทดลองอื่น ๆ เนื่องจากไบโอชาร์แกลบมีองค์ประกอบของปริมาณโพแทสเซียม 1 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง มีค่าเท่ากับ 178.71 เซนติโมลต่อกิโลกรัม มีค่าสูงกว่าดินที่มีค่าเท่ากับ 27.74 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และดินผสมกับไบโอชาร์แกลบ มีค่าเท่ากับ 51.22 เซนติโมลต่อกิโลกรัม มีผลให้ค่าการแลกเปลี่ยนประจุบวกของดินที่ใส่ไบโอชาร์แกลบเพิ่มขึ้นมากกว่าไม่ใส่ (ประภัสสร และคณะ, 2563) ไบโอชาร์ที่เกิดสัดส่วนเถ้าสูงจะส่งผลให้มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงตามไปด้วย (Asli *et al*., 2016) ความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารมีความเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนไอออนบนพื้นผิว (Wang *et al*., 2022; Tomczyk *et al*., 2020) ความสามารถในการดูดซับของสารที่มีขั้ว และไม่มีขั้วจะเกี่ยวข้องกับการดูดซับทางเคมีที่เกิดโครงสร้างแอโรแมติกหลอมเชื่อมกัน และพันธะไฮโดรเจนที่ไม่ปกติแบบอ่อน (Ding *et al*., 2016) และการใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ในอัตราที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณโพแทสเซียมที่สะสมในดินเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งการเพิ่มปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ที่มีแบคทีเรียละลายสารประกอบโพแทสเซียม *Bacillus subtilis* ที่ผลิตกรดอินทรีย์ช่วยละลายแร่ธาตุที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบในกลุ่มไมก้า เช่น ไบโอไทต์ มัสโคไวต์ และกลุ่มของเฟลด์สปาร์ เช่น ไมโครไคลน์ ออโทเคลส ให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ สามารถละลายโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มขึ้น 9.02 เปอร์เซ็นต์ (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติไบโอชาร์ด้วยปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว จากคุณสมบัติของไบโอชาร์ที่มีรูพรุนสูง และมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก สามารถดูดซับเซลล์แบคทีเรียจากหัวเชื้อรูปของเหลวได้ดี ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และการสะสมธาตุอาหารในดินเพิ่มขึ้น (Lehmann *et al*., 2011)

ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 2 (ตารางที่ 15) พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับควบคุม ตำรับการทดลอง

ที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมี อัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าระหว่าง 2,140.70 – 2,317.30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า ดินมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้จัดอยู่ในระดับสูง ใกล้เคียงกับก่อนการทดลอง 2,516.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับสูงเช่นกัน

เมื่อพิจารณาปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1 และ 2 พบว่า ทุกตำรับการทดลองมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน มีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากสมบัติของดินก่อนการทดลองดินด่างมีการสะสมปริมาณแคลเซียมของดินอยู่ในระดับสูง อีกทั้งแคลเซียมเป็นธาตุอาหารรองที่จำเป็นต่อพืช มีความจำเป็นต่อการแบ่งเซลล์ และองค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืชมีบทบาทต่อการสร้างโปรตีน ส่งเสริมการดูดดึงไนโตรเจน เป็นต้น แต่พืชต้องการในปริมาณน้อยกว่าธาตุอาหารหลัก จึงมีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างตำรับการทดลอง (พินิจภณ, 2558)

ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 2 (ตารางที่ 15) พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับควบคุม ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ตำรับการทดลองที่ 3 ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด.12 แบบเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าระหว่าง 322.67 - 379.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เกณฑ์การประเมินจากสำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน (2548) มาพิจารณาร่วมด้วย พบว่า ดินมีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้จัดอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง ใกล้เคียงกับดินก่อนการทดลอง 355 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จัดอยู่ในระดับปานกลาง

เมื่อพิจารณาปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ภายหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 1 และ 2 พบว่า ทุกตำรับการทดลองมีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน มีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากสมบัติของดินก่อนการทดลองดินด่างมีการสะสมปริมาณแมกนีเซียมของดินอยู่ในระดับปานกลาง อีกทั้งแมกนีเซียมจัดเป็นธาตุอาหารรองที่จำเป็นต่อพืช เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของคลอโรฟิลล์ แต่พืชดูดใช้ในปริมาณน้อย จึงไม่เห็นความแตกต่างของปริมาณแมกนีเซียมในดินที่ยังคงสะสมอยู่ในดินมาก แสดงว่าพืชนำแมกนีเซียมไปใช้ประโยชน์เพียงเล็กน้อย จึงมีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างตำรับการทดลอง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548; พินิจภณ, 2558)

ตารางที่ 14 สมบัติทางเคมีของดินหลังการทดลองของค่าการนำไฟฟ้า และความเป็นกรดเป็นด่างของดินจากการปลูกครั้งที่ 2

ตำรับการทดลอง	EC (1:5) (dS/m)	pH (1:1)
1 = ไม่ใส่ปุ๋ย (control)	0.13	8.43 a
2 = ปุ๋ยเคมี 100%	0.14	8.43 a
3 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่	0.14	8.33 b
4 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่	0.14	8.47 a
5 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่	0.14	8.33 b
6 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่	0.14	8.30 b
7 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่	0.14	8.27 b
F-test	ns	**
CV (%)	8.09	0.63

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT

ns = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

** = แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 15 สมบัติทางเคมีของดินหลังการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 2

ตำรับการทดลอง	OM (%)	Avail. P (mg/kg)	Exch. K (mg/kg)	Exch. Ca (mg/kg)	Exch. Mg (mg/kg)
1	1.40 c	253.95	62.42 b	2257.70	335.67
2	1.40 c	281.90	70.67 b	2249.70	325.00
3	1.53 bc	296.17	67.67 b	2290.00	322.67
4	1.53 bc	295.33	67.67 b	2317.30	379.00
5	1.83 a	274.43	81.67 b	2211.70	346.00
6	1.67 ab	287.70	130.67 a	2140.70	335.67
7	1.76 a	285.37	150.67 a	2278.00	335.00
F-test	**	ns	**	ns	ns
CV (%)	6.31	10.78	20.87	7.11	9.55

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT
ns = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ
** = แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของดิน

ผลวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของดินภายหลังสิ้นสุดการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 16 ดังนี้

1) สมบัติทางกายภาพของดินก่อนการทดลอง

เมื่อพิจารณาจากค่าวิเคราะห์ความหนาแน่นรวมของดิน (bulk density) เป็นสัดส่วนของมวลของดินแห้งต่อปริมาตรรวมของดิน พบว่า ดินก่อนการทดลองมีค่าความหนาแน่นรวม เท่ากับ 1.67 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อประเมินระดับความหนาแน่นรวมของดินโดยทั่วไปอยู่ในระดับสูง (มีค่าระหว่าง 1.60 - 1.90) (Blake and Hartge, 1986) ทั้งนี้อาจเนื่องจากเนื้อดินแปลงทดลองเป็นดินรวนปนทราย ส่วนดินล่างเป็นดินร่วนเหนียวปนทรายหรือดินร่วนเหนียว โดยทั่วไปความหนาแน่นรวมของดินที่มีโครงสร้างดินดี มีค่า 1.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (วีรวัฒน์, 2558) อีกทั้งอาจเกิดจากการใช้พื้นที่ดังกล่าวทางการเกษตรอย่างต่อเนื่อง และมีการใช้เครื่องจักรกลในการไถพรวนดิน และมีค่าปริมาณน้ำในดินก่อนการทดลองมีค่า 18.19 เปอร์เซ็นต์

2) สมบัติทางกายภาพของดินหลังการทดลอง

ความหนาแน่นรวมของดิน (bulk density) จากการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวมของดินหลังการทดลอง พบว่า ค่าความหนาแน่นรวมของดินในแต่ละตำรับการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างมีสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยตำรับควบคุม ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน และตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ ค่าความหนาแน่นรวมของดินสูงสุด มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่าระหว่าง 1.64 - 1.69

กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อประเมินระดับความหนาแน่นรวมของดินโดยทั่วไปอยู่ในระดับสูง (มีค่าระหว่าง 1.60 - 1.90) และมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีสำคัญยิ่งทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่า 1.50 1.45 และ 1.43 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อประเมินระดับความหนาแน่นรวมของดินมีค่าลดลงอยู่ในระดับปานกลาง (มีค่าระหว่าง 1.30 - 1.60) (Blake and Hartge, 1986) สอดคล้องกับรายงานของ Mankasingh *et al.* (2011) จากการนำไบโอชาร์ไปใช้ในการปรับปรุงดิน พบว่า ไบโอชาร์สามารถลดความหนาแน่นรวมของดินลงได้ จากการใส่ไบโอชาร์ที่อัตราประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถลดความหนาแน่นรวมของดินจาก 1.66 เหลือ 1.53 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และจากการทดลองบ่มดินในคอลัมน์ พบว่า ดินที่เติมไบโอชาร์จะมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าดินที่ไม่ได้เติมไบโอชาร์อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการศึกษาในพื้นที่จริงระยะเวลา 3 ปี โดยค่าความหนาแน่นรวมของดินที่เติมไบโอชาร์ที่ระดับความลึก 0 - 7.5 เซนติเมตร. ลดลง 4.5 และ 6.0 เปอร์เซ็นต์ จากการเติมไบโอชาร์ในอัตรา 0.23 กิโลกรัมต่อตารางเมตร หรือคิดเป็น 368 กิโลกรัมต่อไร่ และ 0.45 กิโลกรัมต่อตารางเมตร หรือคิดเป็น 720 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ และสอดคล้องกับรายงานของณิชาภัทร (2562) การเติมไบโอชาร์จากตอซังข้าวโพดลงในดินอัตรา 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ความหนาแน่นรวมของดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของไบโอชาร์มีผลต่อการลดลงของความหนาแน่นรวมของดิน โดยไบโอชาร์ขนาดเล็กน้อยกว่า 1 และ 1 - 2 มิลลิเมตร ทำให้ความหนาแน่นรวมของดินลดลงได้มากกว่าไบโอชาร์ขนาดใหญ่ 2 - 5 มิลลิเมตร และคุณสมบัติความพรุนสูงของไบโอชาร์สามารถลดความหนาแน่นรวมของดินลงได้อีกด้วย

ปริมาณน้ำในดิน (field water content) จากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำของดินหลังการทดลอง พบว่า ปริมาณน้ำในดินของแต่ละตำรับการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างมีสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยตำรับการทดลองที่ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณน้ำในดินภายหลังทดลองมีค่าสูงสุด 23.37 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างกันสำคัญยิ่งทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 5 และ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 และ 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันมีค่าเท่ากับ 20.47 และ 21.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ทุกอัตรา มีผลให้ปริมาณน้ำในดินสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบตำรับการทดลองที่ 1 – 4 มีค่าปริมาณน้ำในดินภายหลังทดลองไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่าระหว่าง 18.57 – 19.87 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า สมบัติของดินทางกายภาพภายหลังการทดลอง จากการใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ในอัตราที่สูงขึ้น มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในดินตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติของไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 มีรูพรุนสูง สามารถดูดซับน้ำจากปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว และกักเก็บน้ำในดินได้ สอดคล้องกับรายงานของประไพพิศ และคณะ (2564) การใส่ไบโอชาร์อัตรา 1,000 และ 2,000 ตันต่อไร่ มีผลต่อความชื้นในดินที่ช่วงความลึก 0 - 60 เซนติเมตร ในดินเนื้อหยาบมีความชื้นดินสูงกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์ และมีผลต่อการแทรกซึมน้ำของเนื้อดินทรายปนดินร่วนจากการใส่ไบโอชาร์มีผลให้อัตราการแทรกซึมน้ำสูงกว่าการไม่ใส่ไบโอชาร์ สอดคล้องกับผลการศึกษาการใส่ไบโอชาร์ปริมาณ 1 - 2 เปอร์เซ็นต์ ช่วยเพิ่มสมบัติทางกายภาพดินได้ เช่น ความจุน้ำในดิน (Verheijen *et al.,* 2009) และรายงานของ Abel *et al.* (2013) การใส่ไบโอชาร์ 2.5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นสูงสุดในดินทราย และจากรายงานของ Gaskin *et al.* (2008) พบว่า การใส่ไบโอชาร์

8 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ปริมาณน้ำในดินร่วนปนทรายเพิ่มขึ้นเห็นผลชัดเจน และการเติมไบโอชาร์ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มการเก็บน้ำในดิน และการนำไฟฟ้า แต่อาจช่วยเพิ่มความสามารถในการแทรกซึมน้ำของดิน (Igbadunh *et al.,* 2016) อีกทั้งปริมาณน้ำในดินเป็นความชื้นของดินตามธรรมชาติที่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนช่องว่างในดิน แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ลงในดิน จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในดิน ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นรวมของดิน โดยในดินที่มีความหนาแน่นของดินต่ำจะมีช่องว่างในดินสูง และมีปริมาณน้ำในดินสูงมากกว่าดินที่มีความหนาแน่นของดินสูงจะมีช่องว่างในดินลดลง และมีปริมาณน้ำในดินน้อยลง บ่งบอกถึงการบีบอัดของช่องว่างในดิน (สถาพร, 2546)

ตารางที่ 16 สมบัติทางกายภาพของดินก่อนและหลังการทดลองในสภาพแปลงทดลอง

ตำรับการทดลอง	ความหนาแน่นรวมของดิน (ก. /ลบ.ซม.)	ปริมาณน้ำในดิน (%)
ก่อนการทดลอง	1.67	18.19
1 = ไม่ใส่ปุ๋ย (control)	1.68 a	18.57 d
2 = ปุ๋ยเคมี 100%	1.64 ab	18.69 d
3 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมักอัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่	1.69 a	19.06 cd
4 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่	1.56 bc	19.87 cd
5 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่	1.50 cd	20.47 bc
6 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่	1.45 d	21.78 b
7 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่	1.43 d	23.37 a
F-test	**	**
CV (%)	3.58	4.18

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT
** = แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

4.3.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแบคทีเรียในดินหลังการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรีย 4 ชนิด ได้แก่ ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืชในดินภายหลังสิ้นสุดการทดลองจากการปลูกครั้งที่ 2 (ตารางที่ 17) มีรายละเอียดดังนี้

ปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระในดินหลังการทดลอง พบว่า ทุกตำรับการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ จากการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์

แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ หรือการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ หรือการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระในดิน มีค่าระหว่าง 4.812 – 5.167 log เซลล์ต่อกรัม ขณะที่ตำรับควบคุมและการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวมีค่า 4.499 และ 4.966 log เซลล์ต่อกรัม ตามลำดับ

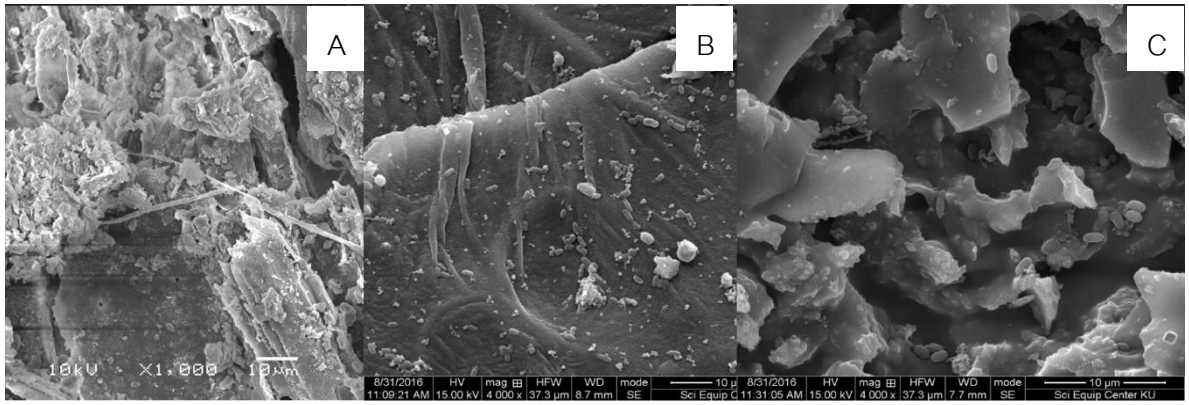
ปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัสในดินหลังการทดลอง พบว่า ทุกตำรับการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ จากการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ หรือการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ หรือการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีปริมาณแบคทีเรียละลายฟอสฟอรัสในดิน มีค่าระหว่าง 5.494 – 6.148 log เซลล์ต่อกรัม ขณะที่ตำรับควบคุมและการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวมีค่า 5.440 และ 5.203 log เซลล์ต่อกรัม ตามลำดับ

ปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมในดินหลังการทดลอง พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ หรือการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ หรือการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมในดิน มีค่าสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 7.380 – 7.826 log เซลล์ต่อกรัม มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุมและการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว มีปริมาณเชื้อ 6.676 และ 6.711 log เซลล์ต่อกรัม ตามลำดับ

ปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืชในดินหลังการทดลอง พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืชในดินหลังการทดลองสูงสุด 5.186 log เซลล์ต่อกรัม มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณเชื้อ 4.809 log เซลล์ต่อกรัม แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีปริมาณเชื้อ 4.474 log เซลล์ต่อกรัม และการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ของอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพขยายเชื้อปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ หรือการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ ตำรับควบคุม และการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีปริมาณเชื้อระหว่าง 4.045 - 4.335 log เซลล์ต่อกรัม

เมื่อพิจารณาปริมาณแบคทีเรียภายหลังสิ้นสุดการทดลอง พบว่า แนวทางการเพิ่มปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ประกอบด้วย แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืชลงในดิน ได้แก่ การใส่ปุ๋ยชีวภาพรูปแบบการขยายเชื้อในปุ๋ยหมักหรือการขยายเชื้อแบบชนิดเหลว หรือการใส่ปุ๋ยชีวภาพแบบเหลวร่วมกับไบโอชาร์ลงดิน มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณแบคทีเรียในดินทั้ง 4 ชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเชื้อในดินตามธรรมชาติก่อนการทดลองที่มีแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ 4.240 log เซลล์ต่อกรัม แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส 4.429 log เซลล์ต่อกรัม

แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม 5.718 log เซลล์ต่อกรัม และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช 3.707 log เซลล์ต่อกรัม ซึ่งมีปริมาณเชื้อในดินใกล้เคียงกับรายงานการตรวจพบปริมาณเชื้อตามธรรมชาติในพื้นที่ต่าง ๆ ในบริเวณรอบรากพืช โดยทั่วไป พบแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ *Azotobacter chroococcum* ในดินมีปริมาณ 10^4 – 10^5 เซลล์ต่อกรัม หรือ 4.00 ถึง 5.00 log เซลล์ต่อกรัม โดยปริมาณและการกระจายตัวของแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระในดินจะเพิ่มหรือลดจำนวนตามความชื้น และค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินที่เปลี่ยนแปลง (ธงชัย, 2550) ในดินแบคทีเรียละลายฟอสเฟตท้องถิ่นประมาณ 10^4 เซลล์ต่อกรัม หรือ 4.00 log เซลล์ต่อกรัม เช่น ในดินที่ปลูกผัก ปลูกถั่ว ปลูกหญ้า ธัญพืช และไม้ผล (Carrenho *et al*., 2007) จากรายงานในดินในพื้นที่ปลูกมันสำปะหลัง จังหวัดชลบุรี มีปริมาณแบคทีเรียละลายโพแทสเซียมอยู่ในช่วง 1.4×10^4 - 4.0×10^4 เซลล์ต่อกรัมดิน หรือ 4.146 – 4.602 log เซลล์ต่อกรัม (บุษราพร, 2562) และแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช พบปริมาณมากบริเวณรอบรากพืช เช่น รากข้าวในพื้นที่ดินเค็ม พบว่า มีอยู่ในช่วง 1.5×10^4 ถึง 8.5×10^6 เซลล์ต่อกรัมดิน หรือ 4.176 – 6.929 log เซลล์ต่อกรัม (Nadeema *et al*., 2012) เมื่อนำตัวอย่างไบโอชาร์ในดินหลังการทดลองมาตรวจสอบการเข้าอาศัยของเซลล์แบคทีเรียภายในรูพรุนของไบโอชาร์แกลบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพที่ 6 ลักษณะภาพ 3 มิติ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า และกำลังขยาย 4,000 เท่า พบเซลล์ของแบคทีเรียจำนวนมากที่ยังคงมีชีวิตรอดภายในรูพรุนของไบโอชาร์แกลบ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Husna *et al*. (2019) เชื้อจุลินทรีย์สามารถคงความหนาแน่นของเชื้อในการจัดเก็บรักษาสูงบนไบโอชาร์แกลบ ซึ่งถ่านไบโอชาร์มีศักยภาพสูงสุดในเก็บรักษาจำนวนประชากรเชื้อได้นานมากกว่า 6 เดือน ทั้งนี้ การใส่ปุ๋ยชีวภาพเพิ่มลงในดินเป็นการเพิ่มจำนวนประชากรของจุลินทรีย์ดินกลุ่มที่เป็นประโยชน์ทางการเกษตร และการใช้ไบโอชาร์เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณแบคทีเรียในดิน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Muhammad *et al.* (2016) พบวา การใชไบโอชารจากกากออยทำใหมวลชีวภาพจุลินทรียเพิ่มขึ้น และการใชไบโอชารอัตราเพิ่มขึ้นทำใหมวลชีวภาพของจุลินทรียเพิ่มขึ้น (Steiner, 2006) และจากการใชไบโอชารอัตรา 2,000 ตันต่อไร่ มีผลให้มวลชีวภาพคาร์บอนของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นมากกว่าการใส่มูลสุกรเพียงอย่าง (นวลจันทร์ และคณะ, 2560) ดังนั้นการเพิ่มจุลินทรีย์ที่เป็นประโยนชน์ทางการเกษตรลงในดิน ส่งผลดีต่อการหมุนเวียนธาตุอาหาร หรือช่วยให้ธาตุอาหารเป็นประโยชน์กับพืช มาใช้ในการปรับปรุงบำรุงดินทางชีวภาพ ทางกายภาพ หรือทางชีวเคมี (Stevenson and Elliott, 1989)



ภาพที่ 6 ลักษณะเซลล์แบคทีเรียบนพื้นผิวและช่องว่างรูพรุนของไบโอชาร์แกลบภายหลังการทดลอง (A) กำลังขยาย 1,000 เท่า (B) และ (C) กำลังขยาย 4,000 เท่า

ตารางที่ 17 ปริมาณแบคทีเรียในดินก่อนและหลังการทดลองสิ้นสุดจากการปลูกครั้งที่ 2

ตำรับการทดลอง	ปริมาณแบคทีเรีย (log เซลล์ต่อกรัม)			
	แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ	แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส	แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม	แบคทีเรีย์สร้างฮอร์โมนพืช
ก่อนการทดลอง	4.240	4.429	5.718	3.707
1	4.499	5.440	6.676 b	4.045 d
2	4.966	5.203	6.711 b	4.327 cd
3	5.167	6.148	7.455 a	4.292 cd
4	5.114	5.549	7.380 a	4.335 cd
5	4.819	5.589	7.677 a	4.474 bc
6	4.812	5.494	7.826 a	4.809 ab
7	5.007	5.954	7.585 a	5.186 a
F-test	ns	ns	**	**
CV (%)	10.62	7.57	3.65	5.27

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT
ns = ไม่แตกต่างกันทางสถิติ
** = แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

4.3.4 การเจริญเติบโตและผลผลิตของคะน้า

จากผลการทดลองและเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตและผลผลิตของคะน้าจากการปลูกทั้ง 2 ครั้ง นำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ มีรายละเอียดดังนี้

1) ความสูงของต้นคะน้า

การปลูกครั้งที่ 1 ความสูงของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 18) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน มีผลให้ความสูงของต้นคะน้าเท่ากับ 35.88 เซนติเมตร มีค่าสูงสุดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีผลให้ความสูงต้นคะน้าไม่แตกต่างทางสถิติ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่าระหว่าง 28.55 - 31.24 เซนติเมตร แต่ทุกตำรับการทดลองมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุมที่มีค่าความสูงของต้นคะน้าน้อยที่สุด 15.91 เซนติเมตร

การปลูกครั้งที่ 2 ความสูงของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 18) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่

มีค่าความสูงของต้นคะน้าสูงสุด เท่ากับ 23.63 เซนติเมตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน และตำรับการทดลองที่ 5 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ในอัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าความสูงของต้นคะน้า 22.04 และ 22.03 เซนติเมตร ตามลำดับ แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าความสูงของต้นคะน้า 19.40 เซนติเมตร ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 แบบเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ ค่าความสูงของต้นคะน้า 20.62 และ 21.16 เซนติเมตร ตามลำดับ และทุกตำรับการทดลองมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุมมีค่าความสูงของต้นคะน้าต่ำสุด 11.70 เซนติเมตร

เมื่อพิจารณาจากค่าความสูงของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวจากการปลูกครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 เห็นได้ว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับถ่านไบโอชาร์-ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลให้ค่าความสูงของต้นคะน้าเพิ่มขึ้นในการปลูกครั้งที่ 2 สูงสุด แต่มีค่าไม่แตกต่างทางสถิติกับการใส่ปุ๋ยเคมี 100 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดการใช้ปุ๋ยเคมีได้ 25 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับการใส่ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ หรือการใส่ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ สอดคล้องกับรายงานของจันจิรา และ พิมพ์ธิดา (2552) การใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยเคมีอัตราครึ่งหนึ่งที่แนะนำ มีผลให้การเจริญเติบโตของต้นข้าวโพดที่ 45 วัน มีน้ำหนักต้นแห้ง เส้นผ่าศูนย์กลางโคนต้น และความสูงต้นมากกว่าการไม่ใส่เชื้อ จากรายงานของปณิชา และ วิลาวัล (2553) การใช้ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ตามคำแนะนำมีผลให้ค่าความสูงของต้นข้าวสูงกว่าการไม่ใส่เชื้ออย่างมีนัยสำคัญยิ่ง และสอดคล้องกับการศึกษาการใส่ไบโอชาร์ต่อการเจริญเติบโตหรือผลผลิตของพืชบางชนิด เช่น ข้าว (วิชัย และคณะ, 2554; วิชุตา, 2556; เสาวคนธ์, 2557) และคะน้า (เกศศิรินทร์ และคณะ, 2557) สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงดินและเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจากไบโอชาร์ที่ประกอบด้วยจุลินทรีย์จากปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ประกอบด้วยเชื้อ *Azotobacter tropicalis* สามารถตรึงก๊าซไนโตรเจนในอากาศ และเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแอมโมเนียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช มีค่าการตรึงไนโตรเจน 1,246 นาโนโมลเอทิลีนต่อต้นต่อชั่วโมง ในการทดสอบกับข้าวโพด (พิกุล และ ดารารัตน์, 2552) จุลินทรีย์ที่ให้ธาตุฟอสฟอรัส *Burkholderia unamae* สามารถผลิตกรดอินทรีย์ปลดปล่อยออกมาละลายสารประกอบอนินทรีย์ฟอสเฟตที่อยู่ในรูปไม่ละลาย เช่น หินฟอสเฟต ให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดไปใช้ได้ มีประสิทธิภาพละลายในดินที่มีสภาพเป็นกรด กลาง และด่างเล็กน้อย ให้อยู่ในรูปฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มขึ้น 14.27 เปอร์เซ็นต์ 13.76 เปอร์เซ็นต์ และ 48.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ฉวีวรรณ, 2552) มีจุลินทรีย์ที่ให้ธาตุโพแทสเซียม *Bacillus subtilis* เป็นจุลินทรีย์ที่ปลดปล่อยกรดอินทรีย์ช่วยละลายแร่ธาตุที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบในกลุ่มไมก้า เช่น ไบโอไทต์ มัสโคไวต์ และกลุ่มของเฟลด์สปาร์ เช่น ไมโครไคลน์ ออโทเคลส ให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ สามารถละลายโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มขึ้น 9.02 เปอร์เซ็นต์ (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) และจุลินทรีย์ที่สร้างสารกระตุ้นการเจริญเติบโตหรือฮอร์โมนพืช *Azotobacter chroococcum* แบคทีเรียสร้างออกซิน จิบเบอเรลลิน และไซโตไคนิน กระตุ้นการเจริญของรากขนอ่อน และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวราก ทำให้ความสามารถในการดูดน้ำและธาตุอาหารเพิ่มมากขึ้น สามารถสร้างฮอร์โมนออกซิน 56.18 มิลลิกรัมต่อลิตร (Leaungvutiviroj *et al.,* 2010) มีผลกระตุ้นการงอกของคะน้าจาก 60 เปอร์เซ็นต์ เป็น 93.33 เปอร์เซ็นต์

(พิมพ์ธิดา และคณะ, 2552) ช่วยกระตุ้นการเจริญของรากขนอ่อน และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวราก ทำให้มีความสามารถในการดูดน้ำและธาตุอาหารเพิ่มมากขึ้น นอกจากความเป็นประโยชน์ของจุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ต่อการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชแล้ว การใช้ประโยชน์จากไบโอชาร์ยังช่วยให้ธาตุอาหารเป็นประโยชน์กับพืชเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน ลดการสูญเสียธาตุอาหารพืชจากการชะล้างด้วยน้ำฝน หรือการให้น้ำจากระบบการปลูกพืช จากคุณสมบัติของไบโอชาร์ที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง อีกทั้งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ส่งผลให้ไบโอชาร์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำในดิน เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น กระตุ้นให้เกิดการจับตัวของเม็ดดิน และช่วยให้พืชสามารถจับยึดธาตุอาหารจากดินได้ดีขึ้น ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชดีขึ้น (Wang *et al.,* 2021)

ตารางที่ 18 ความสูงของต้นคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวในการปลูกครั้งที่ 1 และการปลูกครั้งที่ 2

ตำรับการทดลอง	ความสูง (เซนติเมตร)	
	ปลูกครั้งที่ 1	ปลูกครั้งที่ 2
1 = ไม่ใส่ปุ๋ย (control)	15.91 c	11.70 d
2 = ปุ๋ยเคมี 100%	35.88 a	22.04 ab
3 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่	31.24 b	20.62 bc
4 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่	30.49 b	21.16 bc
5 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่	29.57 b	22.03 ab
6 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่	30.17 b	23.63 a
7 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่	28.55 b	19.40 c
F-test	**	**
CV (%)	8.14	6.24

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT
** = แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

2) ค่าความเขียวของใบคะน้า

การปลูกครั้งที่ 1 ค่าความเขียวของใบคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 19) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าความเขียวของใบคะน้ามีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับการใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 44.46 - 45.24 SPAD reading แต่

ทุกตำรับการทดลองมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุมที่มีค่าความเขียวของใบคะน้าต่ำสุด 39.10 SPAD reading

การปลูกครั้งที่ 2 ค่าความเขียวของใบคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 19) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าความเขียวของใบคะน้าสูงสุดมีค่าระหว่าง 47.34 – 50.14 SPAD reading และไม่แตกต่างกันทางสถิตกับการใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน มีค่าระหว่าง 45.87 SPAD reading แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุมที่มีค่าความเขียวของใบคะน้าต่ำสุด 41.92 SPAD reading

เมื่อพิจารณาจากค่าความเขียวของใบคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวจากการปลูกทั้ง 2 ครั้งพบว่า การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ หรือการใส่ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ หรือปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถเพิ่มความเขียวของใบคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวสูงขึ้น มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับการใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน สอดคล้องกับรายงานของทัพไท และคณะ (2554) การใส่ไบไอชาร์อัตรา 1,280 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าระดับคลอโรฟิลล์ในใบข้าวสูงกว่าการไม่ใส่ และจากการวัดปริมาณแอมโมเนียมไอออนของดินลึก 0 - 10 เซนติเมตร ระยะข้าวสร้างน้ำนม การใส่ไบโอชาร์อัตรา 1,280 และ 2,560 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถตรึงแอมเนียมไอออนได้ 5.32 และ 5.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ และมีค่าสูงกว่าการไม่ใส่ไบไอชาร์ และการใส่ไบไอชาร์อัตรา 640 กิโลกรัมต่อไร่ สามารถตรึงแอมเนียมไอออนได้ 4.82 และ 4.68 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดินแห้ง ตามลำดับ และสอดคล้องกับรายงานของ Zwieten *et al.* (2010) การใส่ไบไอชาร์สามารถประสิทธิภาพการดูดใช้ไนโตรเจนของข้าวสาลีเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ สมบัติของไบไอชาร์มีพื้นที่ผิวมาก รุพรุนสูง และช่วยดูดซับประจุของธาตุอาหารพืชในดิน ช่วยลดการชะล้างไนโตรเจนจากผิวดิน โดยการดูดซับแอโมเนียมไอออนไว้ (Ding *et al*., 2010; Zheng *et al.,* 2010) จึงเพิ่มความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนจากปุ๋ยเคมี อีกทั้งการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถสร้างธาตุอาหารในตรึงก๊าซไนโตรเจนในอากาศ และเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแอมโมเนียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (พิกุล และ ดารารัตน์, 2552) จึงส่งผลต่อการสะสมธาตุไนโตรเจนในพืช และความเขียวใบพืชมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 19 ค่าความเขียวของใบคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกครั้งที่ 1 และการปลูกครั้งที่ 2

ตำรับการทดลอง	ความเขียว (SPAD reading)	
	ปลูกครั้งที่ 1	ปลูกครั้งที่ 2
1 = ไม่ใส่ปุ๋ย (control)	39.10 c	41.92 b
2 = ปุ๋ยเคมี 100%	44.88 a	45.87 ab
3 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่	41.71 bc	48.40 a
4 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่	45.09 a	50.14 a
5 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่	45.24 a	47.34 a
6 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่	44.46 ab	49.47 a
7 = ปุ๋ยเคมี 75% + ถ่านไบโอชาร์-ปุ๋ยชีวภาพ พด.12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่	44.74 ab	49.34 a
F-test	**	*
CV (%)	3.94	5.47

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT

* = แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

** = แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

3) ขนาดพื้นที่ใบของคะน้า

การปลูกครั้งที่ 1 ขนาดพื้นที่ใบของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 20) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีขนาดพื้นที่ใบของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 77.81 – 91.40 ตารางเซนติเมตร แต่มีค่าต่ำกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ มีขนาดพื้นที่ใบของคะน้าสูงสุด 118.56 ตารางเซนติเมตร มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 แบบเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน มีค่า 107.08 และ 107.09 ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ แต่ทุกตำรับการทดลองมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุมที่มีขนาดพื้นที่ใบของคะน้าต่ำสุด 34.47 ตารางเซนติเมตร

การปลูกครั้งที่ 2 ขนาดพื้นที่ใบของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว 2 (ตารางที่ 20) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีขนาดพื้นที่ใบของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวสูงสุด 67.08 ตารางเซนติเมตร รองลงมา คือ ตำรับการทดลองที่ 2

การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ ตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ ตำรับการทดลองที่ 5 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติมีค่าระหว่าง 60.30 - 65.18 ตารางเซนติเมตร แต่ทุกตำรับการทดลองมีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุมที่มีขนาดพื้นที่ใบของคะน้าต่ำสุด 18.71 ตารางเซนติเมตร

เมื่อพิจารณาจากค่าวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ใบของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวจากการปลูกครั้งที่ 1 การใส่ถ่านไบโอชาร์ในอัตราที่เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มให้ขนาดพื้นที่ใบของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวลดลงด้วย อาจเนื่องจากไบโอชาร์มีความสามารถดูดซับธาตุอาหารพืชในดินทั้งโมเลกุลประจุบวกและประจุลบของสารอาหารพืช (Atkison *et al.,* 2010) จึงอาจมีผลกระทบต่อการดูดใช้ธาตุอาหารของพืช ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช และขนาดพื้นที่ใบคะน้าได้ แต่จะเห็นได้ว่า จากผลการทดลองในการปลูกครั้งที่ 2 การใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ในทุกอัตรามีผลให้ขนาดพื้นที่ใบของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวไม่แตกต่างกันกับการใส่ปุ๋ยเคมี 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากถ่านไบโอชาร์มีความการดูดซับธาตุอาหารในพื้นที่ผิวและรูพรุนแล้ว เพื่อกักเก็บธาตุอาหารได้ และลดการสูญเสียธาตุอาหารจากชะล้าง นอกจากคุณสมบัติในการดูดซับธาตุอาหาร ยังสามารถปลดปล่อยคายการดูดซับธาตุอาหารได้ และปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้า ๆ โดยมีกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับแร่ธาตุอาหาร และการควบคุมความเข้มข้นของธาตุอาหารในดิน (Wang *et al*., 2022)

4) น้ำหนักแห้งของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว

การปลูกครั้งที่ 1 น้ำหนักแห้งของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 21) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ มีน้ำหนักแห้งของต้นคะน้าสูงสุด 2.74 กรัมต่อต้น มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่า 2.47 และ 2.26 กรัมต่อต้น ตามลำดับ มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 5 6 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีน้ำหนักแห้งของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าระหว่าง 1.82 – 2.01 กรัมต่อต้น แต่ทุกตำรับการทดลองมีค่าสูงกว่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุมที่มีค่าน้ำหนักแห้งของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวต่ำสุด 0.47 กรัมต่อต้น

การปลูกครั้งที่ 2 น้ำหนักแห้งของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว (ตารางที่ 21) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด.12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีน้ำหนักแห้งของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวสูงสุด 1.91 กรัมต่อต้น มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน มีน้ำหนักแห้งของต้นคะน้า 1.97 กรัมต่อต้น แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่า 1.50 และ 1.45 กรัมต่อต้น และมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับการทดลองที่ 5 การใส่

ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีน้ำหนักแห้งของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวมี มีค่า 1.58 และ 1.57 กรัมต่อต้น ตามลำดับ แต่ทุกตำรับการทดลองมีค่าสูงกว่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุมที่มีค่าน้ำหนักแห้งของต้นคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวต่ำสุด 0.90 กรัมต่อต้น

ตารางที่ 20 ขนาดพื้นที่ใบคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกครั้งที่ 1 และการปลูกครั้งที่ 2

ตำรับการทดลอง	ขนาดพื้นที่ใบ (ตร.ซม.)	
	ปลูกครั้งที่ 1	ปลูกครั้งที่ 2
1 = ไม่ใส่ปุ๋ย (control)	34.47 d	18.71 c
2 = ปุ๋ยเคมี 100%	107.09 ab	65.18 ab
3 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่	118.56 a	55.84 b
4 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่	107.08 ab	62.55 ab
5 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่	91.40 bc	60.98 ab
6 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่	81.99 c	67.08 a
7 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่	77.81 c	60.30 ab
F-test	**	**
CV (%)	11.52	10.14

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT
** = แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 21 น้ำหนักแห้งต่อต้นคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกครั้งที่ 1 และการปลูกครั้งที่ 2

ตำรับการทดลอง	น้ำหนักแห้งต่อต้น (กรัมต่อต้น)	
	ปลูกครั้งที่ 1	ปลูกครั้งที่ 2
1 = ไม่ใส่ปุ๋ย (control)	0.47 d	0.90 c
2 = ปุ๋ยเคมี 100%	2.47 ab	1.97 a
3 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมักอัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่	2.74 a	1.50 b
4 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่	2.26 abc	1.57 ab
5 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่	2.01 bc	1.58 ab
6 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่	1.99 bc	1.91 a
7 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่	1.82 c	1.45 b
F-test	**	**
CV (%)	15.17	14.58

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT
** = แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

5) น้ำหนักผลผลิตของคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยว

การปลูกครั้งที่ 1 น้ำหนักผลผลิตของคะน้า (ตารางที่ 22) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน มีผลให้น้ำหนักผลผลิตคะน้าสูงสุด เท่ากับ 5,440 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าน้ำหนักผลผลิตคะน้า 5,072 และ 4,720 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ รองลงมา คือ ตำรับการทดลองที่ 3 การใช้ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ ตำรับการทดลองที่ 5 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ มีค่าน้ำหนักผลผลิตคะน้า 4,448 4,528 และ 4,416 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ แต่ทุกตำรับการทดลองมีค่าสูงกว่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุมมีค่าน้ำหนักผลผลิตคะน้าต่ำสุด 1,008 กิโลกรัมต่อไร่

การปลูกครั้งที่ 2 น้ำหนักผลผลิตของคะน้า (ตารางที่ 22) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีน้ำหนัก

ผลผลิตของคะน้าสูงสุด 2,928 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับตำรับการทดลองที่ 5 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมี 100 เปอร์เซ็นต์ และตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าน้ำหนักผลผลิตของคะน้าระหว่าง 2,624 – 2,784 กิโลกรัมต่อไร่ แต่มีค่าสูงกว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 3 การใช้ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด.12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ มีค่าน้ำหนักผลผลิตของคะน้า 2,288 กิโลกรัมต่อไร่ และทุกตำรับการทดลองมีค่าสูงกว่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุมมีค่าน้ำหนักผลผลิตคะน้าต่ำสุด 624 กิโลกรัมต่อไร่

เมื่อพิจารณาน้ำหนักผลผลิตคะน้าจากการปลูกทั้ง 2 ครั้ง จากข้อมูลน้ำหนักผลผลิตคะน้าจากการปลูกครั้งที่ 2 ปลูกช่วงเดือนมีนาคมถึงเดือนเมษายน มีสภาพอากาศร้อนจัด ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของคะน้า จึงมีค่าน้ำหนักผลผลิตคะน้าต่ำกว่าการปลูกครั้งที่ 1 ที่ปลูกในช่วงฤดูหนาว แต่เมื่อพิจารณาจากค่าวิเคราะห์จากการปลูกครั้งที่ 2 พบว่า ค่าความสูงต้น ขนาดพื้นที่ใบ น้ำหนักแห้งของคะน้า และน้ำหนักผลผลิตคะน้า เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ตำรับการทดลองที่ 6 มีการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ให้ค่าน้ำหนักผลผลิตคะน้าที่อายุเก็บเกี่ยวมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่สูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน สอดคล้องกับรายงานของเกศศิรินทร์ และคณะ (2557) การใส่ไบโอชาร์ในอัตราที่เพิ่มขึ้นจาก 400 เป็น 800 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้คะน้ามีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ผลผลิตคะน้าสูงขึ้น และจากรายงานของเกศศิรินทร์ และคณะ (2558) การศึกษาอัตราส่วนของไบโอชาร์ 1,000 - 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งผลการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักสลัดกรีนคอส มีค่าไม่แตกต่างกับการใส่ปุ๋ยคอกที่อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ การใส่ไบโอชาร์เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงตามไปด้วย (Asli *et al.,* 2016) และความสามาถในการดูดซับสารละลายของ ไบโอชาร์ที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง ช่วยกักเก็บน้ำและธาตุอาหารพืชในดิน (พินิจภณ , 2558) ส่งผลต่อการดูดซับธาตุอาหารพืชไว้ในไบโอชาร์ เมื่อไบโอชาร์ดูดซับธาตุอาหารและน้ำเต็มพื้นที่ผิวรูพรุน ก็จะปลดปล่อยธาตุอาหารพืชออกมาเป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นเช่นกัน สอดคล้องกับรายงานของ Wang *et al.* (2022) การประยุกต์ใช้ไบโอชาร์เป็นปุ๋ยละลายช้าจากสมบัติของไบโอชาร์ที่มีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารเท่านั้น แต่ยังมีสมบัติในการคายการดูดซับได้ สามารถเพิ่มความเป็นประโยชน์ของแร่ธาตุอาหาร การควบคุมความเข้มข้นของธาตุอาหารในดิน และการเพิ่มธาตุอาหารในระบบชีวภาพอีกด้วย อีกทั้งความเป็นประโยชน์ของปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 เป็นปัจจัยส่งเสริมในการปรับปรุงดิน และเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารให้กับพืช ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความสูงต้นคะน้า ความเขียวของใบคะน้า ขนาดพื้นที่ใบของคะน้า และน้ำหนักผลผลิตคะน้า สามารถลดการใช้ปุ๋ยเคมีสำหรับการปลูกคะน้า 25 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งการใส่ปุ๋ยชีวภาพประกอบด้วย แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระมีประสิทธิภาพตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ 231 นาโนโมลเอทิลีนต่อต้นต่อชั่วโมง แบคทีเรียละลายฟอสเฟตมีประสิทธิภาพการละลายหินฟอสเฟต 48.22 เปอร์เซ็นต์ แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม มีประสิทธิภาพการละลายแร่เฟลสปาร์ 9.02 เปอร์เซ็นต์ และแบคทีเรียผลิตฮอร์โมนพืช มีประสิทธิภาพฮอร์โมนออกซิน 56.18 มิลลิกรัมต่อลิตร (ฉวีวรรณ และคณะ, 2552) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารหลักที่พืชต้องการในปริมาณมากสำหรับการเจริญเติบโตและผลผลิตพืช และการใช้ประโยชน์ไบโอชาร์หรือปุ๋ยหมักในการปรับปรุงเพิ่มแหล่งอินทรียวัตถุให้แก่ดิน เป็นที่อาศัยของจุลินทรีย์ ส่งเสริมความเป็นประโยชน์ให้จุลินทรีย์ดินในการหมุนเวียนธาตุอาหารพืช อีกทั้งไบโอชาร์ช่วยเพิ่มการดูดซับทั้งธาตุอาหารและ

น้ำให้พืชใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น ลดการชะล้างโดยการจัดการดิน วิธีการดังกล่าว ส่งผลให้ดินมีสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพที่เหมาะสม มีดุลยภาพด้านชนิด ประชากร และกิจกรรมจุลินทรีย์ พืชย่อมมีแนวโน้มที่จะได้รับธาตุอาหารต่าง ๆ มากขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มผลผลิตของพืชตามไปด้วย

ตารางที่ 22 น้ำหนักต้นคะน้าที่ระยะเก็บเกี่ยวจากการปลูกครั้งที่ 1 และการปลูกครั้งที่ 2

ตำรับการทดลอง	น้ำหนักต้นคะน้า (กิโลกรัมต่อไร่)	
	ปลูกครั้งที่ 1	ปลูกครั้งที่ 2
1 = ไม่ใส่ปุ๋ย (control)	1,008 c	624 c
2 = ปุ๋ยเคมี 100%	5,440 a	2,624 ab
3 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่	4,448 b	2,288 b
4 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่	4,720 ab	2,784 ab
5 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่	4,528 b	2,720 ab
6 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่	5,072 ab	2,928 a
7 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่	4,416 b	2,688 ab
F-test	**	**
CV (%)	11.54	13.55

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติโดยวิธีการ DMRT

** = แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

4.4 ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้า

จากการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้าทั้ง 2 ครั้ง มีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้าครั้งที่ 1

ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้าครั้งที่ 1 (ตารางที่ 23) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 2 การใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน ให้รายได้สุทธิสูงสุด 102,880.40 บาทต่อไร่ รองลงมา คือ ตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ หรือตำรับการทดลองที่ 3 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพในปุ๋ยหมัก 300 กิโลกรัมต่อไร่ ให้รายได้สุทธิ 88,210.30 และ 82,170.30 บาทต่อไร่ ตามลำดับ ขณะที่ตำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ให้รายได้สุทธิ 80,100.30 บาทต่อไร่ สูงกว่าตำรับการทดลอที่ 5 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับ

ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ให้รายได้สุทธิ 74,220.30 และ 61,980.30 บาทต่อไร่ ตามลำดับ

4.4.2 ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้าครั้งที่ 2

ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้าครั้งที่ 2 (ตารางที่ 23) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 6 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ให้รายได้สุทธิสูงสุด 52,820.30 บาทต่อไร่ รองลงมา คือ ตำรับการทดลองที่ 4 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่ ให้รายได้สุทธิ 49,490.30 บาทต่อไร่ สูงกว่าตำรับการทดลองที่ 5 และ 7 การใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ ให้รายได้สุทธิ 48,660.30 และ 48,020.30 บาทต่อไร่ ตามลำดับ ให้รายได้สุทธิสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดิน รายได้สุทธิ 46,560.40 บาทต่อไร่ ทั้งนี้จากการประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการปลูกคะน้าทั้ง 2 ครั้ง จะเห็นได้ว่า รายได้สุทธิจากการปลูกครั้งที่ 2 จากการใส่ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใส่ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ มีรายได้สุทธิสูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีอัตราตามค่าวิเคราะห์ดินเพิ่มขึ้น 13.44 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากการปลูกคะน้าครั้งที่ 2 ไม่มีค่าต้นทุนของไบโอชาร์แกลบ เนื่องจากใส่เพียงครั้งเดียวในการปลูกครั้งที่ 1 จึงช่วยลดค่าต้นทุนไบโอชาร์แกลบ หากมีการผลิตไบโอชาร์แกลบใช้เองจะสามารถลดต้นทุนค่าวัสดุในส่วนนี้ได้

ตารางที่ 23 ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจในจากการปลูกครั้งที่ 1 และการปลูกครั้งที่ 2 หน่วย : บาทต่อไร่

ตำรับการทดลอง	รายได้สุทธิ (บาท)		
	ปลูกครั้งที่ 1	ปลูกครั้งที่ 2	รายได้รวม
1 = ไม่ใส่ปุ๋ย (control)	15,100.0	7,420.0	22,520
2 = ปุ๋ยเคมี 100%	102,880.4	46,560.4	149,441
3 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ขยายเชื้อในปุ๋ยหมัก อัตรา 300 กิโลกรัมต่อไร่	82,170.3	38,970.3	121,141
4 = ปุ๋ยเคมี 75% + ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อัตรา 300 ลิตรต่อไร่	88,210.3	49,490.3	137,701
5 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่	74,220.3	48,660.3	122,881
6 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่	80,100.3	52,820.3	132,921
7 = ปุ๋ยเคมี 75% + ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 2,000 กิโลกรัมต่อไร่	61,980.3	48,020.3	110,001

บทที่ 5

สรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 วิธีการผลิตไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว มี 2 ขั้นตอน ดังนี้

1) ขั้นตอนที่ 1 การผลิตปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว อาหารเลี้ยงเชื้อประกอบด้วยน้ำกากส่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผสมกากน้ำตาล 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และเติมน้ำให้ครบ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร (เตรียมปริมาตร 100 ลิตร ประกอบด้วยน้ำกากส่า 10 ลิตร : กากน้ำตาล 5 ลิตร : น้ำ 85 ลิตร) ใส่หัวเชื้อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ของกรมพัฒนาที่ดิน 100 กรัม (0.10 เปอร์เซ็นต์) ค้นให้เข้ากัน แล้วเติมออกซิเจนด้วยเครื่องปั๊มออกซิเจนปลาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม เท่ากับ 6.779 6.450 7.973 และ 8.273 log เซลล์ต่อกรัม ตามลำดับ

2) ขั้นตอนที่ 2 การผลิตไบโอชาร์แกลบต่อการดูดซับปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ส่วนผสมประกอบด้วยไบโอชาร์แกลบ 1 ส่วน ต่อปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 ชนิดเหลว 2 ส่วน (อัตราส่วน 1 : 2) แช่ไบโอชาร์แกลบนาน 1 ชั่วโมง มีปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืช แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส และแบคทีเรียละลายโพแทสเซียม เท่ากับ 5.310 5.770 7.200 และ 6.040 log เซลล์ต่อกรัม ตามลำดับ

5.1.2 การใช้ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,000 1,500 และ 2,000 กิโลกรัมต่อไร่ มีผลให้สมบัติทางเคมีของดินภายหลังการทดลอง มีค่าความเป็นด่างของดินลดลง ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน 1.83 1.67 และ 1.76 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สูงกว่าตำรับควบคุม 1.40 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้นคิดเป็น 30.71 19.29 และ 25.71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ปริมาณโพแทสเซียมสะสมในดิน 81.67 130.67 และ 150.67 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สูงกว่าตำรับควบคุม 62.42 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เพิ่มขึ้นคิดเป็น 30.84 109.33 และ 141.38 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลต่อสมบัติทางกายภาพของดิน คือ ลดความหนาแน่นรวมของดิน 1.50 1.45 และ 1.43 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ มีค่าลดลงต่ำกว่าตำรับควบคุม 1.68 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลดลงคิดเป็น 10.71 13.69 และ 14.88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเพิ่มปริมาณน้ำในดิน และผลต่อสมบัติทางชีวภาพในดิน มีการสะสมปริมาณแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ แบคทีเรียละลายฟอสฟอรัส แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม และแบคทีเรียสร้างฮอร์โมนพืชในดินเพิ่มสูงขึ้น

5.1.3 การใช้ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ ส่งเสริมการเจริญเติบโตของคะน้า ด้านความสูงต้น ความเขียวใบ ขนาดพื้นที่ใบ และน้ำหนักแห้งต้นเพิ่มสูงขึ้น และให้ผลผลิตคะน้าในการปลูกครั้งที่ 2 สูงสุด 2,928 กิโลกรัมต่อไร่ สูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดิน 2,624 กิโลกรัมต่อไร่ เพิ่มขึ้นคิดเป็น 11.58 เปอร์เซ็นต์ และลดการใช้ปุ๋ยเคมีได้ 25 เปอร์เซ็นต์

5.1.4 ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการใช้ปุ๋ยเคมี 75 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไบโอชาร์แกลบ - ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 อัตรา 1,500 กิโลกรัมต่อไร่ สำหรับการผลิตคะน้ามีผลให้รายได้สุทธิเพิ่มขึ้นในการปลูกครั้งที่ 2 เท่ากับ 52,820.30 บาทต่อไร่ สูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินที่ให้รายได้สุทธิ 46,560.40 บาทต่อไร่ เพิ่มขึ้นคิดเป็น 13.44 เปอร์เซ็นต์

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

5.2.1 สามารถนำต้นแบบการผลิตและวิธีการใช้ประโยชน์ ถ่ายทอดสู่นักวิชาการและเกษตรกร นำไปต่อยอดขยายผลการใช้ประโยชน์ในพื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ดินเสื่อมโทรม และพื้นที่ดินความอุดมสมบูรณ์ต่ำด้วยไบโอชาร์ที่เป็นอินทรียวัตถุรูปเสถียรเพื่อการบำรุงดิน เพิ่มจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ในการเพิ่มแหล่งธาตุอาหารพืชจากธรรมชาติ ส่งเสริมระบบนิเวศในดิน ลดปัญหาดินเสื่อมโทรม และเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินให้เหมาะสมสำหรับการผลิตพืชได้อย่างยั่งยืน และช่วยเพิ่มขีดความสามารถด้านปัจจัยการบำรุงด้วยอินทรียวัตถุที่มีอยู่ในประเทศได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่า

5.2.2 สามารถใช้เอกสารวิชาการเป็นแหล่งข้อมูล และเป็นคู่มือแนวทางการจัดการด้านการบำรุงดินด้วยอินทรียวัตถุ จากการใช้ประโยชน์ไบโอชาร์วัสดุเหลือใช้ทางเกษตรของแต่ละท้องถิ่นมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน จากคุณสมบัติเด่นที่มีรูพรุนสูง อุ้มน้ำได้ดี ดูดซับ และลดการสูญเสียธาตุอาหารพืช มีองค์ประกอบของอินทรีย์คาร์บอนที่คงตัวสูง และมีช่องว่างที่เป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ นำมาใช้ประโยชน์ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพ เพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชจากธรรมชาติ เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน เป็นแนวทางให้ผู้บริหาร นักวิชาการ และเกษตรกร นำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนด้านการบำรุงดินด้วยอินทรียวัตถุเพื่อการพัฒนาที่ดินอย่างยั่งยืน

5.2.3 สามารถนำองค์ความรู้ไปใช้ในการบริหารจัดการเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และอุตสาหกรรมเกษตรในพื้นที่ หมุนเวียนและสร้างมูลค่าทางชีวภาพเพื่อเป็นแหล่งอินทรียวัตถุในดิน ปัจจุบันการผลิตไบโอชาร์มีรูปแบบการผลิตที่ง่าย และต้นทุนต่ำ เกษตรกรสามารถนำแนวทางไปปฏิบัติใช้ประโยชน์ได้เองในพื้นที่ เป็นแนวทางการส่งเสริมเกษตรกรให้พึ่งพาตนเอง ด้านการบำรุงดินในการรักษา ฟื้นฟู และยกระดับอินทรียวัตถุในดิน เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน และเพิ่มผลิตภาพดินในการผลิตพืชสูงขึ้น เป็นการสร้างภูมิคุ้มกัน ความมั่นคงของชีวิตเกษตรกรและประเทศ และเกิดการเกื้อกูลระบบนิเวศเกษตรที่ยั่งยืน ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม อย่างสมดุล มั่นคง และยั่งยืนของครอบครัว สังคม และประเทศ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมด้านการปรับปรุงดินด้วยไบโอชาร์ที่ผลิตจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และอุตสาหกรรมเกษตรรูปแบบต่าง ๆ ที่มีในท้องถิ่น ร่วมกับการใช้ประโยชน์ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 หรือจุลินทรีย์ควบคุมโรคพืช ในการเพิ่มอินทรียวัตถุในดิน เพิ่มผลผลิตภาพดิน และผลผลิตพืชตามศักยภาพของดินที่แตกต่างกัน ๆ และศึกษาผลจากการใช้ประโยชน์ในระยะยาวต่อคุณภาพดินด้านสมบัติทางกาย ทางเคมี และทางชีวภาพของดิน ในพื้นที่ดินมีอินทรียวัตถุต่ำ จะเป็นข้อมูลในการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.3.2 ควรมีการขยายผลจากการวิจัยสู่แปลงสาธิตร่วมกับการจัดการดินแบบผสมผสาน สำหรับผลิตพืชชนิดต่าง ๆ ตามศักยภาพของดินในแต่พื้นที่ เพื่อให้เกษตรกรเกิดความมั่นใจ นำไปปฏิบัติได้อย่างเป็นรูปธรรม และประยุกต์ใช้ขยายผลได้เป็นวงกว้าง

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2551. **การปรับปรุงบำรุงดินด้วยอินทรียวัตถุ กรมพัฒนาที่ดิน**. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

____. 2557. **ลักษณะและสมบัติของชุดดินในภาคกลาง**. กองสำรวจดินและวิจัยทรัพยากรดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

____. 2562ก. **คำอธิบายลักษณะและสมบัติของชุดดินจัดตั้งในประเทศไทย**. กองสำรวจดินและวิจัยทรัพยากรดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

____. 2562ข. **การใช้ผลิตภัณฑ์เทคโนโลยีชีวภาพ กรมพัฒนาที่ดิน เพื่อส่งเสริมการใช้สารอินทรีย์ลดการใช้สารเคมี**. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

กรมวิชาการเกษตร. 2548. **คำแนะนำการใส่ปุ๋ยกับพืชเศรษฐกิจ.** กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

เกศศิรินทร์ แสงมณี, ชัยนาม ดิสถาพร และ สุรชัย สุวรรณชาติ. 2557. การจัดการดินด้วยเทคโนโลยีชีวภาพและถ่านชีวภาพในการผลิตผักคะน้าในดินทราย, น. 70. *ใน* **การประชุมวิชาการและนำเสนองานวิจัยพืชเขตร้อนและกึ่งร้อนครั้งที่ 8 วันที่ 20 – 21 กรกฎาคม 2557**. มหาวิทยาลัยหอการค้า, กรุงเทพฯ.

____, ธีระรัตน์ ชิณแสน และ ณัฐพงษ์ พันธภา. 2558. การศึกษาอัตราส่วนของถ่านชีวภาพต่อคุณสมบัติทางเคมีของดินปลูก การเจริญเติบโต และผลผลิตของผักสลัดกรีนคอส, น. 746-752. *ใน* **การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 53: สาขาพืช.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. **ระบบข้อมูลและธาตุอาหารพืชเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพืช.** เอกสารประกอบการฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

จิตนิภา ศรีวัธนทรัพย์. 2558. **นักวิจัยแนะเกษตรกรใส่ “ถ่านชีวภาพ” ร่วมกับปุ๋ยเคมีเพิ่มผลผลิตข้าวไร่**. แหล่งที่มา: http//www.kku.ac.th. กองบริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 1 กันยายน 2566.

จันจิรา แสงสีเหลือง และ นวลจันทร์ ชะบา. 2562. **การวิจัยการใช้ประโยชน์น้ำกากส่าเพื่อผลิตปุ๋ยชีวภาพตรึงไนโตรเจน ละลายฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และสร้างฮอร์โมนพืช**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

____ และ พิมพ์ธิดา เรืองไพศาล. 2552. **ศึกษาการใช้ประโยชน์ผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพต่อการเจริญเติบโตของพืช**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

____, พิมพ์ธิดา เรืองไพศาล และ พนิดา ปรีเปรมโมทย์. 2559. **การพัฒนารูปแบบผลิตภัณฑ์ปุ๋ยชีวภาพตรึงไนโตรเจนละลายฟอสฟอรัสโพแทสเซียม และสร้างฮอร์โมนพืชชนิดเม็ดต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

ฉวีวรรณ เหลืองวุฒิวิโรจน์. 2552. ปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน และผลผลิตทางการเกษตร, น. 4. *ใน* **เอกสารประกอบการประชุม การเสนอผลงานวิชาการภาคนิทรรศการ วันที่ 13-15 พฤษภาคม 2552**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

____, พิมพ์ธิดา เรืองไพศาล และ จันจิรา แสงสีเหลือง. 2552. **การแยกและคัดเลือกจุลินทรีย์ละลายโพแทสเซียมให้เป็นประโยชน์ต่อพืช**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

____, พิกุล เกตุชาญวิทย์ และพิมพ์ธิดา เรืองไพศาล. 2554. **วิจัยและพัฒนาปุ๋ยชีวภาพ พด. 12 เพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตทางการเกษตร**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

ชฎาภา ใจหมั้น. 2564. **ผลของการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดิน และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกภายใต้ระบบการปลูกข้าว**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

ฐปน ชื่นบาล, ศิราภรณ์ ชื่นบาล และ ปิยะบุตร โพธิคามบำรุง. 2552. **การกำจัดสีในน้ำกากส่าโดยใช้เชื้อผสมระหว่างเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่ม WHITE-ROT FUNGI และเชื้อยีสต์**. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

ณิชาภัทร สิทธิวรนันท์. 2562. **ผลของการใช้ถ่านชีวภาพต่อความอุดมสมบูรณ์ของการกักเก็บน้ำในดินและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ดนัย พรอำนวยลาภ และ วิวัฒน์ สวยสม. 2565. ผลของถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์บนพื้นที่ลาดเท ในกลุ่มชุดดินที่ 55 จังหวัดน่าน, น. 72-82. *ใน* **เอกสารประชุมวิชาการ กรมพัฒนาที่ดิน ปี 2565**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

ทัพไท หน่อสุวรรณ, อรรถชัย จินตะเวช และ สิทธิชัย ลอดแก้ว. 2554. ความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอชาร์เพื่อเพิ่มผลผลิตในระบบการผลิตข้าวนาสวน. *ใน* **รายงานการสัมมนาระบบเกษตรแห่งชาติ ครั้งที่ 7**.

ทัศนีย์ ดิฐกมล. 2551. การใช้ประโยชน์ของน้ำกากส่าสำหรับการผลิตอ้อยเพื่อลดมลพิษสิ่งแวดล้อม: กรณีอ้อย ปลูกปีแรก. **วิจัยรามคำแหง ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.** 11 (1): 11-29.

____ และ สมบูรณ์ แก้วปิ่นทอง. 2547. ประโยชน์น้ำกากส่าสำหรับการผลิตข้าวจังหวัดขอนแก่น. **วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยรามคำแหง**. 7 (ฉบับพิเศษ): 132-151.

ธงชัย มาลา. 2550. **ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ: เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์**. พิมพ์ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

____. 2557. **การตรึงไนโตรเจนทางชีวภาพ.** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นวลจันทร์ ชะบา, จันจิรา แสงสีเหลือง และ วุฒิชัย จันทรสมบัติ. 2560. **ศึกษาการใชไบโอชารตอการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมมวลชีวภาพและสังคมของจุลินทรียดินในพื้นที่ปลูกผักระบบเกษตรอินทรีย**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

บรรเจิดลักษณ์ จินตฤทธิ์ และรติกร ณ ลำปาง. 2560. **การประเมินคุณภาพดินและการใช้ถ่านชีวภาพ (ไบโอชาร์) เพื่อเพิ่มคาร์บอนในดินและเพิ่มผลผลิตพืชผักอินทรีย์ในพื้นที่ดินกรด**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

บุษราพร ไชยพันธ์. 2562. การสำรวจปริมาณของจุลินทรีย์ดินที่เป็นประโยชน์ทางการเกษตร ในพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังจังหวัดชลบุรี. **วารสารดินและปุ๋ย.** 41: 24 - 33.

ปณิชา จันทร์เปล่ง และ วิลาวัลย์ เรียนเวช. 2553. **การใช้ผลิตภัณฑ์หัวเชื้อจุลินทรีย์ผลิตปุ๋ยชีวภาพเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตข้าว จังหวัดอ่างทอง**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

ประพิน ขันธเลิศ และ กฤษณะ หอมตลบ. 2552. **การใช้ผลิตภัณฑ์หัวเชื้อจุลินทรีย์ผลิตปุ๋ยชีวภาพเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตกะหล่ำปลีจังหวัดตาก**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

ประไพพิศ ศรีมาวงษ์, วันเพ็ญ วิริยะกิจจนทีกุล, สรุเชษฐ์ นาราภัทร์, อรอนงค์ โฉมศิริ และกุลภัทร ยิ้มพักตร์. 2557. **สมบัติเคมี-กายภาพ และการดูดซับธาตุอาหารพืชของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

____, นภัสสร โน๊ตศิริ, ปราณี จอมอุ่น, ชนิดา เกิดชนะ, ชนิดา จรัญวรพรรณ และ รัตนาชาติ ช่วยบุดดา. 2564. **ผลการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพต่อปริมาณความชื้นและการแทรกซึมน้ำในดินปลูกมันสำปะหลัง**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

ประภัสสร รัตนไพบูลย์, นิกราน หอมดวง, ณัฐวุฒิ ดุษฎี, ภคมน ปินตานา และ ชูรัตน์ ธารารักษ์. 2563. การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากแกลบและซังข้าวโพดเพื่อปรับปรุงดิน. **วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน.** 3 (3): 74-79.

ประวิทย์ สูงสุด, นิวัต เหลืองชัยศรี, จักรกฤษณ์ หอมจันทร์ และ ชุลีมาศ บุญไทย. 2550. การใส่น้ำกากส่าจากโรงงานเอทานอลเพื่อประโยชน์ทางการเกษตร. **วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)**. 7 (4): 13-19.

พิกุล หรรษานิมิตกุล และ ดารารัตน์ โฮตาก้า. 2552. การคัดเลือกอะโซโตแบคเตอร์ที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มผลผลิตพืช, น. 88-89. *ใน* **เอกสารประชุมวิชาการดินและปุ๋ยแห่งชาติ ครั้งที่ 1 เรื่องดินและปุ๋ยในภาวะวิกฤตอาหารและพลังงาน วันที่ 23-24 เมษายน 2552**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พินิจภณ ปิตุยะ. 2558. **ผลของการผสมถ่านชีวภาพในดินทรายบริเวณพื้นที่เงาฝนเพื่อเพิ่มผลผลิตงาดำ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, จุฬาลงกรณ์มาวิทยาลัย.

พิมพ์ธิดา เรืองไพศาล, ฉวีวรรณ เหลืองวุฒิวิโรจน์ และ ดารารัตน์ โฮตาก้า. 2552. การพัฒนาผลิตภัณฑ์เชื้อจุลินทรีย์ที่สร้างฮอร์โมนเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช, น. 51. *ใน* **เอกสารประชุมวิชาการดินและปุ๋ยแห่งชาติ ครั้งที่ 1 เรื่องดินและปุ๋ยในภาวะวิกฤตอาหารและพลังงาน วันที่ 23-24 เมษายน 2552**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พูนสุข ประเสริฐสรรพ์. 2558. **การใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือทางอุตสาหกรรมเกษตร**. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

ไพจิตรา กระแจหิน. 2552. **การใช้ประโยชน์จากน้ำกากส่าเพื่อผลิตไฮโดรเจน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภารุจีร์ ภูมิไกล. 2556. **สภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อ *Azotobacter vinelandii* ในการผลิตปุ๋ยชีวภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรึงไนโตรเจนสำหรับปลูกอ้อย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ยงยุทธ โอสถสภา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และ ชวลิต ยังประยูร. 2551. **ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

รัชฎา เลกุล และ วิสาขา ภู่จินดา. 2563. แนวทางการใช้ประโยชน์จากน้ำกากส่าจากการผลิตสุราสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. **วารสารวิจัยรำไพพรรณี.** 14 (1): 139.

วิชัย ลิมโพธิ์ทอง, สลิตา สุสิงห์ และ ชัยนาม ดิสถาพร. 2554. **การศึกษาชนิดและอัตราที่เหมาะสมของถ่านชาร์ร่วมกับการใช้ปุ๋ยเคมีในการเพิ่มผลผลิตของข้าวปทุมธานี1 ในสภาพดินทราย**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

วิชุตา กัลยาศิริ. 2556. **ผลของถ่านชีวภาพที่มีต่อผลผลิตข้าวและคุณภาพดินเหนียวปนทราย กรณีศึกษาตำบลป่าเด็ง อำเภอแก่งกระจาน จังหวัดเพชรบุรี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วีรวัฒน์ นิลรัตนคุณ. 2558. ก**ารเพิ่มผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยการใช้ปุ๋ยอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ.** สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 2 กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

สายชล สุขญาณกิจ, สิริวรรณ สมิทธิอาภรณ์, ธนภัทร ปลื้มพวก และ ธนวรรณ พาณิชพัฒน์. 2563. ผลของถ่านชีวภาพร่วมกับการจัดการปุ๋ยต่อผลผลิตและความเข้มข้นธาตุอาหารในถั่วฝักยาวไร้ค้าง. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.** 28 (3): 443-454.

สถาพร คูวิจิตรจารุ. 2546. **ทดลองปฐพีกลศาสตร์**. ไลบรารี่ นาย พับลิชชิ่ง, กรุงเทพฯ.

สุดชล วุ้นประเสริฐ. 2555. **การศึกษาสัดส่วนและความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชในการผลิตผักคะน้าและผักชีในระบบการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดินในระบบปิด**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

เสาวคนธ์ เหมวงษ์. 2557. ผลของถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่และแกลบต่อผลผลิต และประสิทธิภาพการดูดใช้ไนโตรเจน ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.** 16 (1): 69 - 75.

เสาวรส เหลือนุ่นขาบ. 2560. **การผลิตก๊าซชีวภาพน้ำกากส่าของโรงงานสุรากลั่นชุมชนโดยใช้กลยุทธ์การหมักร่วม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาทักษิณ.

สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน. 2548. **คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุย พืช วัสดุปรับปรุงดินและการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินคา.** พิมพครั้งที่ 2. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

อรสา สุกสว่าง. 2552. เทคโนโลยีถ่านชีวภาพ: วิธีแก้ปัญหาโลกร้อน ดิน และความยากจนในภาคเกษตรกรรม. การประชุมวิชาการเรื่อง **สภาวะโลกร้อน: ความหลากหลายทางชีวภาพและการใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน**, 5-6 พฤศจิกายน 2552 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขต กำแพงแสน.

อภิเชษฐ หมื่นอร่าม, วิเชียร ลีลาวัชรมาศ และ ประมุข ภระกูลสุขสถิตย์. ม.ป.ป. **ผลของกากน้ำตาลและกากเซลล์ยีสต์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ต่อการผลิตแบคทเรียกรดแลกติก**. แหล่งที่มา: https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/BKN_AGRO/search_detail/dowload_digital_file/12626/101967, 5 สิงหาคม 2566.

อุชุกร พรหมมานนท์ และ วรภา นาเมือง. 2552. **การใช้ผลิตภัณฑ์หัวเชื้อจุลินทรีย์ผลิตปุ๋ยชีวภาพเพื่อเพิ่มความอุดสมบูรณ์ดินและผลผลิตยางพารา จังหวัดมุกดาหาร**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

อำพร สอนนำ และ ไชยยา สุดสะอาด. 2552. **การใช้ผลิตภัณฑ์หัวเชื้อจุลินทรีย์ผลิตปุ๋ยชีวภาพเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

Abdelhafez, A.A., M.H. Abbas and J. Li. 2017. Biochar: the black diamond for soil Sustainability, contamination control and agricultural production. **Engineering applications of biochar**. P. 2.

Abel, S., A. Peters, S. Trinks, H. Schonsky, M. Facklam and G. Wessolek. 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. **Geoderma** 183–191.

Alburquerque, J.A., J.M. Calero, V. Barron, J. Torrent, M.C. del Campillo, A. Gallardo and R. Villar. 2014. Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. **Journal of Plant Nutrition and Soil Scicene** 177 (1): 16-25.

Alling, V., S.E. Hale, V. Martinsen, J. Mulder, A. Smebye, G.D. Breedveld and G. Cornelissen. 2014. The role of biochar in retaining nutrients in amended tropical soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 177 (5): 671-680.

Angers, D. and S. Recous. 1997. Decomposition of wheat straw and rye residues as affected by particle size. **Plant and Soil** 189: 197-203.

Asadullah, M., M.A. Rahman, M.M. Ali, M.S. Rahman, M.A. Motin, M.B. Sultan and M.R. Alam. 2007. Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. **Fuel** 86: 2514-2520.

Asli, T.T., G. Duman, S. Ucar and L. Yanik. 2016. Effects of feedstock type and pyrolysis temperature on potentiall applications of biochar. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 2016 (120): 200-206.

Atkinson, C.J., J.D. Fitzgerald and N.A. Hipps. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar applicaton to temperate soils. **Plant Soil** 337: 1–18.

Bajpai, P.D. and W.V.B. Sundara. 1971. Phosphate dissolution by bacteria. **Soil Sci. Plant Nutr.** 17: 46 – 53.

Bashan, Y. 1998. Inoculant of plant growth-promoting bacterial for use in agriculture. **Bio-tech. Adv.** 16 (4): 729-770.

Blake, G.R. and K.H. Hartge. 1986. Bulk density. In: Klute, A., Ed., Methods of Soil Analysis, Part 1-Physical and Mineralogical Methods, 2nd Edition, **Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison**. 363-382.

Brady, N.C. and R.R. Weil. 2021. **Elements of the nature and properties of soils**. Pearson Prentice Hall.

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

Brewer, C.E. and R.C. Brown. 2012. Biochar. pp. 357-384. In: A. Sayigh, (ED), **Comprehensive Renewable Energy. Elsevier**, Oxford.

Carrenho, R., S.F. Botelho Trufem, V.L. Ramos Bononi and E.S. Silva. 2007. The effect of different soil properties on arbuscular mycorrhizal colonization of peanuts, sorghum and maize. **Acta. Bot. Bras**. 21 (3): 723 – 730.

Cabeza, I., T. Waterhouse, S. Sohi and J.A. Rooke. 2018. Effect of biochar produced from different biomass sources and at different process temperatures on methane production and ammonia concentrations in vitro. **Animal Feed Science and Technology** 237: 1-7.

Cardenas-Aguiar, E., G. Gasco, J. Paz-Ferreiro and A. Mendez. 2017. The effect of biochar and compost from urban organic waste on plant biomass and properties of an artificially copper polluted soil. **International Biodeterioration & Biodegradation** 124: 223-232.

Cheng, H., D.L. Jones, P. Hill, M.S. Bastami and C.L. Tu. 2018. Influence of biochar produced from different pyrolysis temperation on nutrient retention and leaching. **Archives of Agronomy and Soil Science** 64 (6): 850-859.

Chen, Y., H. Wu, P. Sun, J. Liu, S. Qiao, D. Zhang and Z. Zhang. 2021. Remediation of chromium-contaminated soil based on *Bacillus cereus* WHX-1 immobilized on biochar: Cr (VI) transformation and functional microbial enrichment. Front. **Microbiol.** 12: 641913.

Chinsamran, K. and R. Suttisuwan. 2015. Development of bacterial cellulose production in molasses by using coconut juice as the nutrient supplement and adding of gelling agent. **RMUTSB Acad. J.** 3 (2): 98-108.

Chun, Y., G. Sheng, C.T. Chiou and B. Xing. 2004. Compositions and sorptive properties of crop residue-derived chars. **Environmental Science & Technology** 38 (17): 4649-4655.

Cowie, A.L., A.E. Downie, B.H. George, B.P. Singh, L. Van Zwieten and D. O'Connell. 2012. Is sustainability certification for biochar the answer to environmental risks. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira** 47 (5): 637-648.

Ding, W., X. Dong, M. Ime, B. IGao and L.Q. Ma. 2014. Pyrolytic temperatures impact lead sorption mechanisms by bagasse biochars. **Chemosphere** 105: 68-74.

Ding Y, Y.X. Liu, W.X. Wu, D.Z. Shi, M. Yang and Z.K. Zhong. 2010. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns. **Water Air Soil Pollut** 213: 47-55.

Ding Y., Y. Liu, S. Liu, Z. Li, X. Tan, X. Huang, G. Zeng, L. Zhou and B. Zheng. 2016. Biochar to improve soil fertility. A review. **Agronomy for Sustainable Development** 36: 36.

Emilce, V., F. Sineriz and M.E. lucca. 2009. Biofertilizer production bioprocess usingvinasse and cheese whey in the media composition. **8th bi-annual Recent Advances in Fermentation Technology conference, co-sponsored by the Society for Industrial Microbiology (SIM) and the American Chemical Society, Division of Biochemical Technology (ACS BIOT)**. Available Source: https://www.conicet.gov.ar/new_scp/detalle.php?keywords=&id=05436&inst=yes&congresos=yes&detalles=yes&congr_id=910113, October 11, 2023

Gaskin, J.W., C. Steiner, K. Harris, K.C. Das and B. Bibens. 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. **Transactions of the ASABE** 51 (6): 2061-2069.

Glodowska, M., B. Husk, T. Schwinghamer and D. Smith. 2016. Biochar is a growth-promoting alternative to peat moss for the inoculation of corn with a pseudomonad. **Agron. Sust. Dev**. 36 (1): 1-10.

Gomezy, O. 2000. Effect of vinasse on sugarcane productivity. **Rev. Rac. Agron.** 17: 318-326.

Gwenzi, W., T.J. Nyambishi, N. Chaukura and N. Mapope. 2018. Synthesis and nutrient release patterns of a biochar-based N–P–K slow-release fertilizer. **International Jour., J. of Environment Science and Technology** 15 (2): 405-414.

Hidetoshi, A., K.S. Benjamin, M.S. Haefele, S. Khamdok, H. Koki, K. Yoshiyuki, I. Yoshio, S. Tatsuhiko and H. Takeshi. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. **Field Crop Research** 111: 81-84.

Husna, N., D. Budianta, M. Munandar and A. Napoleon. 2019. Evaluation of several biochar types as inoculant carrier for indigenous phosphate solubilizing microorganism from acid sulphate soil. **J. Ecol. Eng.** 20 (6): 1-8.

Igbadunh, H.E., M.K. Othman and A.S. Ajayi. 2016. Infiltration characteristics of organic amended soils. **Glob. J. Res. Eng.** 16: 35-39.

Jadhav, P., M. Sonne, A. Kadam, S. Patil, K. Dahigaonkar and J.K. Oberoi. 2018. Formulation of cost effective alternative bacterial culture media fruit and vegetables waste. Int**. J. Cur. Res. Rev.** 10: 6-15.

Jeffery, S., D. Abalos, M. Prodana, A.C. Bastos, J.W. Van Groenigen, B.A. Hungate and

F. Verheijen. 2017. Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. **Environmental Research Letters** 12 (5): 053001.

Joseph, S., K.Y. Chan, I. Meszaros, A. Downie and L. Van Zwieten. 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. **Australian Journal of soil Research** 45: 132-140.

Jimenez, A.M., R. Borja and A. Martin. 2003. Aerobic-anaerobic biodegradation of beet molasses alcoholic fermentation wastewater. **Process Biochemistry**. 38: 1275-1284.

Jindo, K., H. Mizumoto, Y. Sawada, M.A. Sanchez-Monedero and T. Sonoki. 2014. Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. **Biogeosciences** 11: 6613–6621.

Karel, S.F., S.B. Libicki and C.R. Robertson. 1985. The immobilization of whole cells: engineering principles. **Chem. Eng. Sci.** 40 (8): 1321-1354.

Karhu, K., T. Mattila, I. Bergstrom and K. Regina. 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH_4 uptake and water holding capacity-results from a short-term pilot field study. **Agriculture, ecosystems & environment** 140 (1-2): 309-313.

Kato, H. and H. Tsuchida. 1981. Estimation of melanoidin structure by pyrolysis and oxidation. In; **Prob.Fd Nutr. Sci.** 147-156.

Kirk, G. 2004. **The biogeochemistry of submerged Soils**. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd. 304 pp.

Kumar, T., A. Usmani, Z. Kumar and Z. Anshumail. 2017. Biochar and flyash inoculated with plant growth promoting rhizobacterial act as potential biofertilizer for luxuriant growth and yield of tomato plant**. J. Environ. Manag.** 190: 20-27.

Lauren, H. and D. Crowley. 2014. Evaluation of varying biochars as carrier materials for bacterial soil inoculants. **Geophysical Research Abstracts, United States**. 16, EGU2014-9885-1.

Lee, X.J., L.Y. Lee, S. Gan, S. Thangalazhy-Gopakumar and H.K. Ng. 2017. Biochar potential evaluation of palm oil wastes through stow pyrolysis: thermochemical characterization and pyrolytic kinetic studies. **Bioresource technology** 236: 155-163.

Lehmann, J. 2007. Bio-energy in the black. **The Ecological Society of America**. Available Source: https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[381:BITB] 2.0.CO; 2Citations: 1,147, August 10, 2023.

____, J., M. Rillig, J. Thies, C.A. Masiello, W.C. Hockaday and D. Crowley. 2011. Biochar effects on soil biota a review. **Soil Biology & Biochemistry** 43: 1812-1836.

Leaungvutiviroj, C., P. Ruangphisarn, P. Hansanimitkul, H. Shinkava and K. Sasaki. 2010. Development of a new biofertilizer with a high capacity for N_2 fixation, phosphate and potassium solubilization and auxin production. **Biosci. Biotechnol. Biochem.** 74 (5): 1098-1101.

Li, R., B. Wang, A. Niu, N. Cheng, M. Chen, X. Zhang, Z. Yu and S. Wang. 2022. Application of biochar immobilized microorganisms for pollutants removal from wastewater: A review. **ScienceDirect**. 837.

Liang, B., J. Lehmann, D. Solomon, J. Grossman, B. O'Neill, J.O. Skjemstad, J. Thies, F.J. Luizao, J. Petersen and E.G. Neves. 2006. Black carbon Increases cation exchange capacity in soils. **Soil Sci. Am. J.** 70: 1719-1730.

Liu, X., P. Xue, F. Jia, D. Qiu, K. Shi and W. Zhang. 2020. Tailoring polymeric composite gel beads-encapsulated microorganism for efficient degradation of phenolic compounds. **Chain. J. Chem. Eng.** 32: 301-306.

Major, J., J. Lehmann, M. Rondon and C. Goodale. 2010. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration **Glob. Chang. Biol**. 16: 1366-1379.

Mankasingh, U., P.C. Choi and V. Ragnarsdottir. 2011. Biochar application in a tropical, agricultural region: a plot scale study in Tamil Nadu, India. **Applied Geochemistry** 26: 218-221.

Masulili, A., W.H. Utomoand and M.S. Syechfani. 2010. Rice Husk Biochar for Rice Based Cropping System in Acid Soil 1. The Characteristics of Rice Husk Biochar and Its Influence on the Properties of Acid Sulfate Soils and Rice Growth in West Kalimantan, Indonesia. **Journal of Agricultural Science** 2 (1): 39-47.

Muhammad, A., R. Hayat, Q. Hussain, A. Mukhtar, I. Muhammad and E.C. David. 2016. Effect of biochar amendment on soil microbial biomass, abundance and enzyme activity in the mash bean field. **J. Bio. Env. Sci**. 8:1-13.

Nadeema, S.M., B. Shaharoona, M. Arshad and D.E. Crowley. 2012. Population density and functional diversity of plant growth promoting rhizobacteria associated with avocado trees in saline soils. **Appl. Soil Eco**. 62: 147 - 154.

Nakajima-Kambe, T., M. Shimomura, N. Nomura, T. Chanpornpong and T. Nakahara. 1999. Decolorization of molasses wastewater by *Bacillus* sp. Under thermophilic and anaerobic conditions. **Journal of Bioscience and Bioengineering** 87: 119-121.

Oguntunde, P.G., B.J. Abiodun, A.E. Ajayi and N. Giesen. 2008. Effect of Charcoal production on soil physical properties in Ghana. **J Plant Nutr. Soil Sci.** 171: 591-596.

Omar, N.A, A.T Mostafa and A.S. Ahmed. 2002. Concentrated vinasses as a novel diazotrophs growth medium (Biovinasse Inoculant) and Soil Conditioner to improvefaba bean yield under dripping irrigation system. **17 th WCSS**. 14-21.

O-Thong, S., K. Boe and I. Angelidaki. 2012. "Thermophilic Anaerobic Co-digestion of Oil Palm Empty Fruit Bunches with Palm Oil Efficient Biogas Production. **Applied Energy** 93 (1): 648 - 654.

Paturaul, J.M. 1989. By-products of the cane sugar industry: an introduction to their industrial utilization. **Elsevier.** Available Source: https://www.econbiz.de/Record/by-products-of-the-cane-sugar-industry-an-introduction-to-their-industrial-utilization-paturau-joseph-maurice/10004621893.

Pimchuai, A., A. Dutta and P. Basu. 2010. Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties. **Energy and Fuels** 24: 4638-4645.

Purevsuren, B., B., Avid, B. Tesche, and Y.A. Davaajav. 2003. A Biochar from casein and Its Properties. **Journal of materials science** 38: 2347-2351.

Qian, L., B. Chen and D. Hu. 2013. Effective alleviation of aluminum phytotoxicity by manure-derived biochar. **Environmental science & technology** 47 (6): 2737-2745.

Rawat, J., J. Saxena and P. Sanwal. 2019. Biochar: a sustainable approach for improving plant growth and soil properties. pp. 1-17. **In Biochar-An imperative amendment for soil and the environment**. London: IntechOpen.

Revell, K.T., R.O. Maguire and F.A. Agblevor. 2012. Field trials with poultry litter biochar and its effect on forages, green peppers, and soil properties. **Soil science** 177 (10): 573-579.

Saranya, K., K. Kumutha and P. Santhana Krishnan. 2011. Influence of Biochar and *Azospirillum* Application on the Growth of Maize. **Madras Agric. J.** 98 (4-6): 158-164.

Saribay, G.F. 2003. **Growth and nitrogen fixation dynamics of *Azotobacter chroococcum* in nitrogen-free and OMW containing medium**. M.S. Thesis, The middle east technical university.

Seesawhea, Y., P. Saenphoom, P. Chaokaur, S. Chimtong, S. Bureenok and S. Prajukboonjatsada. 2017. Nutritional improvement of corn peel silage using fermented juice from epiphytic lactic bacteria (FJLB), nutrients digestibility and growth. **Veridian E-Journal. Science and Technology Silpakorn University** 4 (5): 144-156.

Shi, R.Y., J.Y. Li, N. Ni, K. Mehmood, R.K. Xu and W. Qian. 2017. Effects of biomass ash, bone meal, and alkaline slag applied alone and combined on soil acidity and wheat growth. **Journal of Soils and Sediments** 17 (8): 2116-2126.

____, J., Y. Li, J. Jiang, M.A. Kamran, R.K. Xu and W. Qian. 2018. Incorporation of corn straw biochar inhibited the re-acidification of four acidic soils derived from different parent materials. **Environmental Science and Pollution Research** 25 (10): 9662-9672.

Six, J., R.T. Conant, E.A. Paul and K. Pautian. 2002. Soil structure and organic matter. Distribution of aggregation size class and aggregate size classes and aggregate associated carbon. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 64: 681-689.

Steiner, C. 2006. **Slash and Char as Alternative to Slash and Burn: Soil Charcoal Amendments Maintain Soil Fertility and Establish a Carbon Sink.** Ph. D. Dissertation, University of Bayreuth, Bayreuth, 13-28. [Citation Time(s): 2.

Stevenson, F.J. and E.T. Elliott. 1989. **In Coleman D.C., J.M. Oades, G. Uehara (eds**). Dynamic of soil methodologies for Assessing the Quantity and Quality of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystem.University of Hawaii Press. Hawaii. USA. pp. 173-242.

Steinbeiss, S., G. Gleixner and M. Antonietti. 2009. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. **Soil Biol. Biochem** 41 (6). 1301-1310.

Tang, J., Y. Mo, J. Zhang and R. Zhang. 2011. Influence of biological aggregating agents associated with microbial population on soil aggregate stability. **Appl. Soil Ecol.** 47: 153-159.

Tomczyk, A., Z. Sokołowska and P. Boguta. 2020. Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology** 19: 191-215.

Uvarov, A. V. 2000. Effects of Smoke Emissions from a Charcoal Kiln on the Functioning of Forest Soil Systems: A Microcosm Study. **Environmental Monitoring and Assessment** 60 (3): 337-357.

Vasilieva, S., E. Lobakova, T. Grigoriev, I. Selyakh, L. Semenova, O. Chivkunova, P. Gotovtsev, C. Antipova, Y. Zagoskin, P. Scherbakov, A. Lukyanov, K. Lukanina, A. Solovchenko. 2021. Bio-inspired materials for nutrient biocapture from wastewater: microalgal cells immobilized on chitosan-based carriers. **J. Water Process. Eng.** 40, 101774.

Verheijen, F., S. Jeffery, A.C Bastos, M. Van der Velde and I. Diafas. 2010. Biochar application to soils. **A critical scientific review of effects on soil properties**, processes, and functions. EUR, 24099, p. 162.

Verheijen, F.G.A., S. Jeffery, A.C. Bastos, M. van der Velde and I. Diafas. 2009. Biochar application to soils. a critical scientific review of effects on soil properties, processes

and functions. **EUR 24099 EN**, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 149 pp.

Walkley, A. and I.A. Black. 1947. Chromic acid titration method for determination of soil organic matter. **Soil. Sci. Amer. Proc**. 63: 257.

Wang, B., Y. Ma, X. Lee, P. Wu, F. Liu, X. Zhang, L. Li and M. Chen. 2021. Environmental-friendly coal gangue-biochar composites reclaiming phosphate from water as a slow-release fertilizer. **Science of the Total Environment** 758: 143664.

Wang, S., H. Zhang, J. Wang, H. Hou, C. Du, P.C. Ma and A. Kadier. 2022. Application of biochar for wastewater treatment. In: Kapoor, R. T., Treichel, H. and Shah, M.P. (eds.). **Biochar and its Application in Bioremediation**, Singapore: Springer Nature Singapore.

Weber, K. and P. Quicker. 2018. Propertied of biochar. **Fuel.** 217: 240-261.

Wu, C., D. Zhi, B. Yao, Y. Zhou, Y. Yang and Y. Zhou. 2022. Immobilization of microbes on biochar for water and soil remediation: a review. **Environ. Res.** 212: 113226.

Xu, R.K., A.Z. Zhao, J.H. Yuan and J. Jiang. 2012. pH buffering capacity of acid soils from tropical and subtropical regions of China as influenced by incorporation of crop straw biochars. **Journal of Soils and Sediments** 12 (4): 494-502.

Xueyong, Z.H.Q.U., Y.A.N.G. Zhe, L.I.U. Huifen, L.U. Xianzhi and H.A.O. Jianchao. 2018. Effect of soil organic matter on adsorption and insecticidal activity of toxins from bacillus thuringiensis. **Pedosphere** 28 (2): 341-349.

Yang, M., H. Zhang, J. Ni, W. Chen, L. Yang and R. Wei. 2020a. Effect of cadmium on pyrene biodegradation in solution and soil using free and immobilized *Escherichia* sp. on biochar. **Appl. Soil Ecol.** 150: 103472.

Yang, Y.W., X.Y. Duan, J. Jiang, X. Xu and M.Z. Tang. 2020b. Immobilization of cold-resistant mixed bacteria and its application in sequencing batch reactor wastewater treatment. **Appl. Ecol. Environ. Res.** 18 (1): 515-529.

Yao, Y., B. Gao, M. Zhang, M. Inyang and R.Z. Andrew. 2012. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. **ScienceDirect**. 89 (11): 1467-1471.

Yuan, J.H. and R.K. Xu. 2011. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. **Soil Use and Management** 27 (1):110- 115.

Zhang, J., J. Li, D. Ye, X. Zhu, Q. Liao and B. Zhang. 2014. Tubular bamboo charcoal for anode in microbial fuel cells. **J. Power Sources.** 272: 277-282.

Zheng, W., B.K. Sharma and N. Rajagopalan. 2010. Using biochar as a soil amendment for sustainable agriculture: **Illinois Sustainable Technology Center.** Available Source: https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkozje))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2111479, August 10, 2023.

Zheng, R.L., C. Cai, J.H. Liang, Q. Huang, Z. Chen, Y.Z. Huang, H.P.H. Arp and G.X. Sun. 2012. The effects of biochars from rice residue on the formation of iron plaque and the accumulation of Cd, Zn, Pb, As in rice (Oryza sativa L.) seedlings. **Chemosphere** 89 (7): 856-862.

Zhu, X., B. Chen, L. Zhu and B. Xing. 2017. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation. **Environmental Pollution** 227: 98-115.

Zwieten, L.V., S. Kimber, S. Morris, K.Y. Chan, A. Downie and J. Rust. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant Soil** 327: 235-246.